



ASIM

Fachtagung

20. Fachtagung
13.–15. September 2023
TU Ilmenau



Bergmann, Feldkamp, Souren & Straßburger (Hrsg.)

SIMULATION

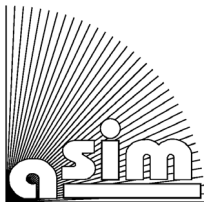
in Produktion und Logistik 2023

**Sören Bergmann, Niclas Feldkamp, Rainer Souren &
Steffen Straßburger (Hrsg.)**

Simulation in Produktion und Logistik 2023

Sören Bergmann, Niclas Feldkamp, Rainer Souren &
Steffen Straßburger (Hrsg.)

Simulation in Produktion und Logistik 2023



tu
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Impressum

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Straßburger
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Informationstechnik
in Produktion und Logistik
Max-Planck-Ring 12
98693 Ilmenau

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Rainer Souren
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Nachhaltige Produktionswirtschaft
und Logistik
Helmholtzplatz 3
98693 Ilmenau

Simulation in Produktion und Logistik 2023

Sören Bergmann, Niclas Feldkamp, Rainer Souren & Steffen Straßburger (Hrsg.)
Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2023.
zgl. Tagungsband 20. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik,
Ilmenau, 13.-15. September 2023.
zgl. ASIM-Mitteilung Nr. 187.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Umschlaggestaltung: Torsten Weilepp, Titelphoto: Michael Reichel (ari).

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<https://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

ISBN 978-3-86360-276-5

DOI 10.22032/dbt.57476

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023100033

Vorwort

Nachhaltigkeit gewinnt in allen Lebensbereichen eine immer größere Bedeutung. Vor allem der Klimawandel und die Energiekrise sind schwerwiegende Herausforderungen, die Konsumenten und Unternehmen gleichermaßen betreffen. Wollen wir die Lebensgrundlagen nicht gefährden, müssen auch Produktions- und Logistiksysteme so gestaltet werden, dass sie ökologisch verträglich und langfristig ressourcenschonend sind. Um eine nachhaltige Transformation zu erreichen, gilt es, innovative Ansätze zu entwickeln und bewährte Verfahren zu überdenken.

Die Simulation spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da sie es ermöglicht, verschiedene Szenarien zu modellieren, zu analysieren und zu optimieren, bevor sie Realität werden. So helfen Klima- oder Energieverbrauchs-simulationen den Entscheidungsträgern bei der Gestaltung einer nachhaltigen Industriepolitik. Im unternehmerischen Kontext eröffnen Simulationen die Möglichkeit, nachhaltige Konzepte zu entwickeln, die den ökonomischen Erfolg mit ökologischer Verträglichkeit und sozialer Akzeptanz vereinen.

Die 20. ASIM-Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik" steht daher bewusst unter dem Motto der „Nachhaltigkeit in Produktion und Logistik“. Sie soll Anregungen und Denkanstöße geben und über bereits erfolgreiche Projekte und Neuerungen berichten.

Der vorliegende Tagungsband präsentiert neben aktuellen Beiträgen aus der klassischen Simulationsforschung und -anwendung, die z.B. den Digitalen Zwilling thematisieren, auch hochinteressante und einschlägige Beiträge zu Fragen der Abbildung energie- und nachhaltigkeitsbezogener Einflussfaktoren in der Simulation.

Wir möchten an dieser Stelle allen Autorinnen und Autoren herzlich für ihre wertvollen Beiträge danken. Durch ihr Engagement bei der Weiterentwicklung und Anwendung der Simulation leisten sie nicht nur einen entscheidenden Beitrag zum Erfolg dieser Tagung, sondern letztlich auch zur Verbesserung realer inner- und überbetrieblicher Wirtschaftsprozesse. Ebenso gilt unser Dank den Mitgliedern des Programmkomitees und den Gutachterinnen und Gutachtern, die ihre Zeit und ihr Fachwissen zur Verfügung gestellt haben, um die Qualität der eingereichten Arbeiten sicherzustellen.

Ein weiterer Dank gebührt unseren Sponsoren und Ausstellern, die mit ihrer Unterstützung die Durchführung dieser Tagung erleichtert haben.

Abschließend möchten wir allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der 20. ASIM-Fachtagung danken. Wir wünschen einen interessanten Aufenthalt an der Technischen Universität Ilmenau mit informativen Vorträgen und lebendigen Diskussionen sowie einen angenehmen Aufenthalt am Rande des Thüringer Walds, dessen Erhalt langfristig nur durch eine nachhaltigere Wirtschafts- und Lebensweise gewährleistet werden kann.

Prof. Dr.-Ing. Steffen Straßburger & Prof. Dr. rer. pol. Rainer Souren
Ilmenau, September 2023

Preface

Sustainability is becoming increasingly important in all areas of life. Climate change and the energy crisis in particular are serious challenges that affect consumers and companies alike. If we do not want to endanger the foundations of life, production and logistics systems must also be designed in such a way that they are ecologically compatible and conserve resources in the long term. In order to achieve a sustainable transformation, it is necessary to develop innovative approaches and rethink proven processes.

Simulation plays a crucial role here, as it enables different scenarios to be modeled, analyzed and optimized before they become reality. For example, climate or energy consumption simulations help policy makers to design sustainable industrial policies. In a business context, simulations open up the possibility of developing sustainable concepts that combine economic success with ecological compatibility and social acceptance.

The 20th ASIM Dedicated Conference on "Simulation in Production and Logistics" is therefore deliberately themed "Sustainability in Production and Logistics". It is intended to provide suggestions and impulses and to report on already successful projects and innovations.

In addition to current contributions from classical simulation research and application, which e.g. address the topic of the digital twin, these proceedings also present highly interesting and relevant contributions on questions of mapping energy- and sustainability-related influencing factors in simulation models.

We would like to take this opportunity to thank all authors for their valuable contributions. Through their commitment to the further development and application of simulation, they not only make a decisive contribution to the success of this conference, but ultimately also to the improvement of real intra- and inter-company economic processes. Likewise, our thanks go to the members of the program committee and the reviewers who gave their time and expertise to ensure the quality of the submitted papers.

Further thanks are due to our sponsors and exhibitors, whose support facilitated the holding of this conference.

Finally, we would like to thank all participants of the 20th ASIM Dedicated Conference. We wish you an interesting stay at the Technical University of Ilmenau with informative lectures and lively discussions as well as a pleasant stay at the edge of the Thuringian Forest, the preservation of which can only be guaranteed in the long run if we all succeed in pursuing a more sustainable economy and lifestyle.

Die ASIM-Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ ist die regelmäßige Tagung der Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Die ASIM ist zugleich der Fachausschuss 4.5 der Gesellschaft für Informatik (GI).

Dieses Buch ist registriert als ASIM-Mitteilung Nummer 187.

Program Committee

Chairmen: Steffen Straßburger, Rainer Souren, TU Ilmenau (Ilmenau, Germany)

Hans-Peter Barbey (Germany)	Anna Römer, IPOL GmbH (Germany)
Thomas Bauernhansl, Universität Stuttgart (Germany)	Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München (Germany)
Sören Bergmann, TU Ilmenau (Germany)	Johannes Schilp, Universität Augsburg (Germany)
Mathias Bös, SDZ GmbH (Germany)	Andreas Schlegel, Fraunhofer IWU (Germany)
Thorsten Claus, IHI Zittau (Germany)	Monika Schneider, RSE+ Fabrik Logistik GmbH (Germany)
Niclas Feldkamp, TU Ilmenau (Germany)	Peter Schuderer, TH Ingolstadt (Germany)
Johannes Fottner, TU München (Germany)	Sven Spieckermann, SimPlan AG (Germany)
Jörg Franke, FAU Erlangen-Nürnberg (Germany)	Dirk Steinhauer, SimPlan AG (Germany)
Kai Gutenschwager, Ostfalia HAW (Germany)	Patricia Stock, REFA-Institut e.V. (Germany)
Frank Herrmann, OTH Regensburg (Germany)	Johannes Stoldt, ABB Stotz-Kontakt GmbH (Germany)
Markus Klug, SSI Schäfer IT Solutions (Austria)	Sebastian Thiede, University of Twente (Netherlands)
Bernd Kuhlenkötter, Ruhr-Universität Bochum (Germany)	Margit Thomsen, InControl Enterprise Dynamics (Germany)
Christoph Laroque, Westsächsische Hochschule Zwickau (Germany)	Sven Völker, Hochschule Ulm (Germany)
Lothar März, Stremler AG (Germany)	Christoph von Viebahn, Hochschule Hannover (Germany)
Torben Meyer, Volkswagen AG (Germany)	Markus Vorderwinkler, University of Applied Sciences Upper Austria (Austria)
Bernd Noche, Universität Duisburg-Essen (Germany)	Sigrid Wenzel, Universität Kassel (Germany)
Sina Peukert, Karlsruher Institut für Technologie (Germany)	
Carsten Pöge, Volkswagen AG (Germany)	
Bastian Prell, TH Wildau (Germany)	
Markus Rabe, TU Dortmund (Germany)	
Tobias Reggelin, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Germany)	
Magnus Richter, TU Ilmenau (Germany)	
Andreas Rinkel, Ostschweizer Fachhochschule Rapperswil (Suisse)	

Contents

SIMULATION IM KONTEXT VON NACHHALTIGKEIT

SIMULATION IN THE CONTEXT OF SUSTAINABILITY

Simulation-based Assessment of Sustainability Metrics in the Transportation Domain: A Systematic Literature Review <i>Staritz, Johannes; Auf der Landwehr, Marvin; von Viebahn, Christoph; Wartenberg, Maylin; Hochschule Hannover</i>	1
Development of a Pull Concept with a Simulation Model for the Start-up Phase of a Fuel Cell Series Production <i>Brützel, Oliver; Werz, Pascal; Overbeck, Leonard; May, Marvin Carl; Lanza, Gisela; Karlsruhe Institute of Technology</i>	11
Transportsimulation für eine nachhaltige, resiliente und qualitätserhaltende Holzlogistik <i>Kogler, Christoph; Rauch, Peter; Universität für Bodenkultur Wien</i>	21
Simulation-based Planning and Design of Hybrid AC/DC Energy Grids for Production Systems: A Holistic Approach <i>Barth, Martin; Gutwald, Benjamin; Russwurm, Eva; Franke, Jörg; Lavery, Melanie; Schwanninger, Raffael; März, Martin; Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</i>	31
Simulative Analyse der nachhaltigen Transformation von Gussbetrieben <i>Detelbacher, Johannes; Schlüter, Wolfgang; Buchele, Alexander; HS Ansbach</i>	41
Simulation Platform for Energetic Considerations in Matrix Production Systems <i>Münnich, Marc; Fraunhofer IWU; Ihlenfeldt, Steffen; Technische Universität Dresden; Thiede, Sebastian; University of Twente</i>	51
Entwicklung und Realisierung einer Modellbibliothek für ein Entscheidungsunterstützungssystem in der Kalksandsteinproduktion <i>Schrage, Tobias; Schuderer, Peter; TH Ingolstadt; Barth, Martin; Franke, Jörg; Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</i>	61
Simulation of a Factory for the Integrated Manufacturing and Remanufacturing of Batteries <i>Overbeck, Leonard; Brunnenkant, Finn; Brützel, Oliver; Lanza, Gisela; KIT</i>	71
Simulative Bestimmung der Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten unter Berücksichtigung von Kundenpräferenzen <i>Huster, Sandra; Unterladstätter, Thomas; Rosenberg, Sonja; Rudi, Andreas; Schultmann, Frank; Karlsruher Institut für Technologie</i>	81

DIGITALE FABRIK UND INDUSTRIE 4.0

DIGITAL FACTORY AND INDUSTRY 4.0

Der Hybride Digitale Zwilling: Eine praxistaugliche Verbindung von Simulation und operationellen Produktionssystemen <i>Scheer, Richard; Straßburger, Steffen; TU Ilmenau; Knapp, Marc; Robert Bosch GmbH</i>	91
Schematic Categorization and Definition of Applied and Target-oriented Digital Twins <i>Spoor, Jan Michael; Karlsruhe Institute of Technology; Weber, Jens; Baden-Wuerttemberg Cooperative State University Loerrach</i>	103
Digital Twin – Einsatzbereiche des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik <i>Matyszczok, Carsten; UNITY AG</i>	113
Vernetzter Digitaler Zwilling zur Einbeziehung der Materialflusssimulation während der Produktentwicklung <i>Lange, Annika; Torka, Jan; Goppold, Jean-Paul; Knothe, Thomas; Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK</i>	125
Simulationsbasierte Untersuchung von Abstraktionsgraden im Kontext Digitaler Zwillinge für innerbetriebliche Transportsysteme <i>Schmid, Florian; Galka, Stefan; Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg; Marinković, Minja; Meißner, Sebastian; Hochschule Landshut</i>	135
Integration von Simulation und Reinforcement Learning zur Portalrobotersteuerung <i>Miltenberger, Robert; Zisgen, Horst; Hochschule Darmstadt; Hochhaus, Markus; Schmidpott, Jürgen; SimPlan AG; Bind, Boris; Fibro Läßle Technology GmbH</i>	145
Fallbeispiele aus Produktion und Logistik für die Verknüpfung von Simulation und Process-Mining <i>Spieckermann, Sven; Stöhr, Niklas; SimPlan AG; Mayer, Gottfried; BMW AG; Özkul, Felix; Wenzel, Sigrid; Universität Kassel</i>	155
Maschinelles Lernen von Maschinenfolgen für den simulationsbasierten Test von Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung <i>Matthes, Marvin; Guhr, Oliver; Munkelt, Torsten; Krockert, Martin; Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden; Völker, Sven; Technische Hochschule Ulm</i>	167
Automatisierte Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten im Rahmen einer Rückwärtssimulation <i>Leißau, Madlene; Laroque, Christoph; Westsächsische Hochschule Zwickau</i>	177
Requirements for a ML- and Platform-based Simulation Service <i>Grzona, Pierre; Technische Universität Chemnitz; Mai Thi, Yen; Westsächsische Hochschule Zwickau; Zumpe, Florian; Münnich, Marc; Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU</i>	187

Grundlayouts für modulare Montagesysteme – ein simulationsbasierter Vergleich <i>Bergmann, Sören; Ehrle, Steven; TU Ilmenau</i>	197
Automatic Generation of a Simulation Model to Support the Rescheduling of a Fixed-Layout Assembly System <i>Billiet, Harold; Stark, Rainer; TU Berlin</i>	207
Simulationsmodell für FTS in Produktionsumgebungen unter Berücksichtigung des Facility Layout Problems <i>Stenzel, Jonas; Schmitz, Lea; Fraunhofer IML Dortmund</i>	217
Praxisbeispiele zur simulationsbasierten Belastungsplanung und -steuerung des Personaleinsatzes in der Montage <i>März, Lothar; STREMLER AG</i>	229
Virtual Commissioning and the Use of Extended Reality and Automated Testing: A Survey of Industry <i>Kunz, David; Weber, Jacob; Barth, Martin; Franke, Jörg; Friedrich-Alexander- Universität Erlangen-Nürnberg</i>	241
LOGISTIK UND SUPPLY CHAIN SIMULATION	
LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN SIMULATION	
Simulation-Based Resolution of Deadlocks in Automated Guided Vehicles using Deep Reinforcement Learning <i>Jelibaghu, Mustafa; Eley, Michael; Palatnik, Alexander; Technische Hochschule Aschaffenburg</i>	251
Herausforderungen für die Projektierung von Mobilern Robotern (FTS und AMR) <i>Dilefeld, Maximilian; DUALIS GmbH IT Solution</i>	261
Ereignisdiskrete Modellierung autonomer Transportfahrzeuge mittels Open-Source Software <i>Artiushenko, Viktor; Müller, Marcel; Reggelin, Tobias; Otto-von-Guericke- Universität Magdeburg; Lang, Sebastian; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung (IFF)</i>	271
Integration eines SAP-Transportleitsystems in eine Simulationsumgebung zur Unterstützung von Entscheidungen im operativen Betrieb <i>Galka, Stefan; Schmid, Florian; OTH Regensburg; Grasser, Dominik; Hohm, Jonathan; Flexus AG; Stauber, Stephan; SimPlan AG; Meißner, Sebastian; Fachhochschule Landshut</i>	281
Simulation-based Analysis of a Value Stream as a Contribution to Sustainable Production and Logistics Systems of SMEs <i>Kiefer, Maximilian; Maaßen, Jonas; Klima, Tobias; Rabe, Markus; TU Dortmund</i>	293

Evaluation of Different Use Case Configurations in a Robotic Mobile Fulfilment System <i>Wenzel, Julia; Tadumadze, Giorgi; Elbert, Ralf; Weidinger, Felix; Technische Universität Darmstadt;</i> <i>Emde, Simon; Friedrich-Schiller-Universität Jena</i>	303
Logistics Objective Conflicts at Intermodal Terminals <i>Grafelmann, Michaela; Aliksieiev, Volodymyr; Lödding, Hermann;</i> <i>Jahn, Carlos; TU Hamburg</i>	313
Generic Simulation Model for Less-Then-Truckload Terminals Based on Requirements of SMEs <i>Mowe, Maximilian; Jurgeleit, Lasse; Kiefer, Maximilian; Schumacher, Christin;</i> <i>Clausen, Uwe; TU Dortmund</i>	323
Datenbeschaffung und -aufbereitung im Kontext einer Lkw-Shuttle-Simulation zwischen Produktionswerk und Logistikzentrum <i>Kexel, Marec; AcuroSim GmbH;</i> <i>Wincheringer, Walter; Hochschule Koblenz</i>	333
Konzeptionierung eines Simulationsmodells der Rettungskette unter Gefechtsbedingungen <i>Meisner, Kai; Sanitätsakademie der Bundeswehr München;</i> <i>Mayer, Thomas; ESG Elektroniksystem- und Logistik GmbH;</i> <i>Stein, Heiderose; Leopold, Nadiia; Uhlig, Tobias; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München</i>	343
Verbesserung der Versorgungssicherheit im Rettungsdienst – Lieferkettenmodellierung bei unvollständigen Daten <i>Kippenberger, Johanna Kim; Görtz, Michael Dominik; Maleki, John Christopher; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik;</i> <i>Geoerg, Paul; Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.</i>	353
Consolidation Strategies for Clothing Logistics in the German Armed Forces: A Simulation Analysis <i>Stein, Heiderose; Uhlig, Tobias; Seufferth, Daniel; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr</i>	363
METHODEN DER SIMULATIONSTECHNIK	
METHODS OF SIMULATION TECHNOLOGY	
Optimierung einer stochastischen MRP-Simulation unter Anwendung der Bayes'schen Optimierung <i>Zmijewski, Philipp; Meseth, Nicolas; Hochschule Osnabrück</i>	373
Deep Reinforcement Learning for Workload Balance and Due Date Control in Wafer Fabs <i>Zhou, Zhugen; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München</i>	383
On the usage of container and container orchestrators as a computational infrastructure for simulation experiments <i>Seufferth, Daniel; Stein, Heiderose; Pappert, Falk Stefan; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München</i>	393

Automated Generation and Simulation of Hyper Heuristics for Stochastic Multi-Mode Multi-Project Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Setup Times <i>Zöllner, Rico; Kühn, Mathias; Handrich, Konrad; Schmidt, Thorsten;</i> <i>TU Dresden</i>	403
Iterative optimierungs-basierte Simulation in der Praxis – Simulation der Oberflächenveredelung der Salzgitter Flachstahl GmbH <i>Oetjegerdes, Patrick; Weckenborg, Christian; Spengler, Thomas Stefan; TU Braunschweig;</i> <i>Vogeler, Udo; Molzberger, Mike; Salzgitter Flachstahl GmbH</i>	413
DISPO 4.0 - Simulationsbasierte Optimierung von Bestelllosgrößen <i>Schmid, Alexander; Granig, Alexander; Sobottka, Thomas; Riester, Martin; Sihn, Wilfried; Fraunhofer Austria Research GmbH</i>	423
Cross-Domain Simulation based on BPMN and the Process-Driven Approach <i>Schobert, Marvin; Lahooti, Pooria; Franke, Jörg; Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS)</i>	433
To Batch or Not to Batch? Real-time Continuous Batch Optimization in a Semiconductor Work Center Environment <i>Brandl, Holger; Roßbach, Philipp; SYSTEMA Systementwicklung Dipl.-Inf. Manfred Austen GmbH;</i> <i>Terbrack, Hajo; Technische Universität Dresden</i>	443
Systematische Zuordnung von Interaktionsmustern der Selbstorganisation zu Arten von Entscheidungsproblemen am Beispiel der Produktionsplanung und -steuerung <i>Krockert, Martin; Matthes, Marvin; Munkelt, Torsten; Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden</i>	453
Einsatz von Process-Mining zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen in Produktion und Logistik <i>Özkul, Felix; Sutherland, Robin; Wenzel, Sigrid; Universität Kassel;</i> <i>Spieckermann, Sven; SimPlan AG</i>	463
Automatisierungspotenzial von Verifikations- und Validierungstechniken in der ereignisdiskreten Simulation <i>Langenbach, Katharina; Scheidler, Anne Antonia; Rabe, Markus;</i> <i>TU Dortmund</i>	473

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation-based Assessment of Sustainability Metrics in the Transportation Domain: A Systematic Literature Review

Simulationsbasierte Bewertung von Nachhaltigkeitskriterien im Transportbereich: Eine systematische Literaturrecherche

Johannes Staritz, Marvin Auf der Landwehr, Christoph von Viebahn, Maylin Wartenberg

Hochschule Hannover, Hannover (Germany)

{johannes.staritz, marvin.auf-der-landwehr, christoph-von.viebahn, maylin.wartenberg}@hs-hannover.de

Abstract: Transportation is crucial for economic prosperity and the quality of life. Yet, it is also associated with negative externalities (e.g. emissions). Developing and implementing more sustainable means of transportation is one of the major concerns of researchers and policy-makers to improve liveability and contribute to environmental conservation. The use of simulation to evaluate sustainability-related indicators of transportation systems has received increasing attention within the last decades. However, research and practice still lack a comprehensive overview of common performance indicators for different transportation modes that are particularly suitable to be analysed by means of simulation-based research. Therefore, we employ a systematic literature review to delineate and conceptualize the status quo of simulation-based sustainability research in the transportation sector. We provide insights on the appropriateness of different simulation methodologies and tools for various transportation modes and sustainability measures and identify research trends and knowledge gaps to provide guidance for prospective simulation-based research.

1 Introduction

As transportation of passengers and freight is one of the primary sources of negative externalities such as environmental emissions, noise and traffic accidents, it is a major concern in the pursuit of sustainability (Menendez and Ambühl 2022). More sustainable transportation systems yield the potential to improve people's quality of life, while at the same time contributing to environmental conservation and creating opportunities for economic growth (Menendez and Ambühl 2022). The main

objective in this context is to invent novel or adapt existing transportation systems that are capable of reducing environmental damages (e.g., by emissions), social fallouts (e.g., noise, safety), and operational costs (e.g., profitability) (Mikušová et al. 2021).

As transportation systems are highly complex and show a large degree of non-linear interdependencies and system components, simulation has become a popular approach to analyse these systems (Auf der Landwehr et al. 2020; Sayyadi and Awasthi 2018). Furthermore, simulation methods are frequently used in transportation contexts as they help to conceptualize and mimic systems with highly intricate interrelationships, various design variants, and operational properties that have not yet been piloted in practice (Wenzel 2018). Therefore, computer simulation and traffic modelling approaches are increasingly used by scholars to investigate the sustainability-related impacts of different transportation systems (Mikušová et al. 2021). The use of simulation to assess sustainability-related impacts caused by a transportation system requires indicators that measure the response of the system with respect to objectives under certain conditions (Sayyadi and Awasthi 2018). In accordance to Sayyadi and Awasthi (2018), such indicators should be measurable, goal oriented, understandable, precise and not multifaceted. Nevertheless, due to the wide range of involved areas, uncertainty and not explicitly defined objectives indicators strongly vary within the literature, which is mainly due to different levels of interest, expertise and knowledge of the involved authors or organizations (Sayyadi and Awasthi 2018).

The global increase of traffic and transportation volume and the growing intention to mitigate its negative effects has led to a large number of simulation studies answering transport- and sustainability-related questions (Menendez and Ambühl 2022; Mikušová et al. 2021). However, current research lacks a comprehensive review of common and relevant key performance indicators for different transportation modes that are particularly suitable to be analysed by means of simulation-based research. Moreover, it is not yet clear in how far the assessment of a given performance metric is contingent on the investigated transportation mode as well as the adopted simulation methodology and software, or vice versa. Therefore, we opt to provide a sound overview on the status quo and interferences of simulation-based research for the assessment of environmental, social, and economic performance indicators within the transportation domain to foster a more holistic understanding of how simulation-based research approaches can be employed to evaluate sustainability in this sector.

For that purpose, we apply a systematic literature review that analyses simulation studies in the context of transportation. In doing so, we address the following research question:

RQ: What simulation-based research approaches can be applied to assess different sustainability indicators in the generic realms of transportation?

2 Theoretical Background

Sustainability is a multifarious concept that relates to three dimensions, namely economy, environment, and society (Litman and Burwell 2006). In the light of trends such as global warming, growing population and exhausted resources, sustainability is a major concern of our time. Especially the transportation sector is in focus of the scientific debate as it is characterized by economic inefficiency, high amounts of

environmental pollution and its socially detrimental effects (Menendez and Ambühl 2022). In this context, various indicators are used to assess economic, social, and ecological performance (Sayyadi and Awasthi 2018).

Frequently used economic measures in the context of transportation are monetary costs, profit, revenue, market share, and product quality (e.g., Tan et al. 2009). Measurements such as fleet size, mileage, utilization, standing time, trip counts, or travel time (e.g. lead times) are also commonly used (e.g., Bae et al. 2022; Linares et al. 2017). While indicators such as energy consumption or waste (e.g., Waisman et al. 2013) are typically associated with environmental sustainability, they also play a role in terms of economic performance as they refer to inefficiencies (e.g., Burinskiene et al. 2018). In order to measure the environmental impacts of transportation, several studies use the indicator GHG emissions (e.g. Fan et al. 2021). Nevertheless, many studies apply more specific measures such as emissions of CO, CO₂, NO_x, PM, ozone pollution (e.g., Basaric et al., 2015; Stark et al. 2018). Besides its impact on air quality, transportation may also influence the environment due to noise and soil pollution (e.g., Stark et al. 2018). Some studies use mileage or modal split (e.g. the share of private motorized transport) as indicators as both are related to detrimental environmental effects (e.g., Waisman et al. 2013). Nevertheless, as modal split directly refers to people's choice to use a transportation system, it is also typically used to assess social sustainability (e.g., Ben-Dor et al. 2022). Similarly, while costs are usually related to monetary benchmarks of operators they may also refer to societal costs (e.g. due to unemployment) (Hu et al. 2020). Other frequently used social indicators are utilization (e.g. the frequency a service is used), accessibility, acceptance, traffic density, travel time, waiting time, and service (e.g., Linares et al. 2017; Fan et al. 2021; Tan et al. 2009). Noise levels caused by transport operations and people's safety can also be found in literature (e.g., Basaric et al. 2015). Due to the emergence of intelligent transportation systems, the measurement of safety not only refers to people's health but also to the privacy of communication flows (Hatzivasilis et al. 2020).

Due to the complex nature of transportation systems, computer simulation and traffic modelling approaches are frequently used to assess their sustainability-related impacts (Mikušová et al. 2021). Using agent-based simulation, Bae et al. (2022) investigate the potential for collaborative planning of a system in urban areas that acts as a freight transport hub with several e-commerce warehouses. They assess the sustainability-related impact of the system using indicators such as mileage, lead times, and utilization. In order to assess the impact of shared autonomous vehicle introduction into the metropolitan area of Jerusalem, Ben-Dor et al. (2022) applied an agent-based simulation modeled in MATSim. They examined the effects of this novel transportation scheme on the existing equilibrium between public transport and private cars using indicators such as modal split or travel time. Tomás et al. (2021) analysed the impacts of carpooling implementation into different university campus networks considering COVID-19 safety measures. Modelling a microscopic traffic simulation, they assess the impacts of carpooling regarding traffic density, mileage, and travel time as well as in terms of different vehicular exhaust emissions.

Few literature reviews exist that provide orientation in the broad field of sustainable transportation. La Torre et al. (2021) review existing work on scientific methodologies used to promote sustainable transportation systems, including simulation and optimization models as well as machine learning and fuzzy sets. Additionally, they provide a classification of challenges, best practices, future trends, and research gaps.

A review conducted by Muller et al. (2021) aims to identify available methodologies for assessing the sustainability impact of potential mobility as a service (MaaS) implementations from a whole system perspective. They provide information about simulation tools and models, relative to their ability to support transportation planners, to holistically assess the MaaS concept, at a city level.

3 Methodology

To address our research question, we followed the rigorous guidelines of Webster and Watson (2002). Following Leidner (2018), the literature review can be classified as ‘assessing review’ and opts to synthesize existing knowledge on the simulation-based assessment of sustainability-related performance indicators in the transportation sector to provide a thorough overview of trends and research gaps. The actual review process consists of multiple phases, namely: (1) database and journal selection, (2) literature search with filtering, (3) backward (i.e., assessing citations from the literature results) and forward (i.e., identifying articles that quote relevant publications discerned during the keyword search) search as well as (4) classification based on performance indicators for measuring sustainability, simulation technique, simulation-software, transport mode, and determinant (Webster and Watson 2002).

During our review, we considered more than 700 publications from different research disciplines, focusing mainly, but not exclusively, on simulation-, sustainability-, and transport-related conferences and journals. Our search results predominantly stem from a keyword search that has been conducted in Scopus between January and April 2023 for the fields abstract, title, and keywords applying the following search string:

("simulat" AND "transport*" AND "sustainab*" AND ("mobility" OR "logistic*"))*

After excluding duplicates and non-English publications, we obtained a set of 663 papers. Subsequently, the first and second author of this paper independently read the abstract, introduction and results of each article and determined its relevance by assessing whether a publication applies simulation methods in order to assess sustainability indicators in the field of transportation. Ultimately, we identified 339 relevant publications applying various simulation techniques and software to transport and sustainability related questions. All relevant papers were subsequently analysed regarding sustainability indicators, simulation techniques, simulation software, and determinants (e.g. policies whose impacts were measured) used and coded. Afterwards, the coding was reviewed by the authors. In case of discordances or disagreements, the authors discussed their opinions to reach a joint verdict about the in- or exclusion as well as individual coding of a given publication.

4 Results

Out of the 339 publications that we analysed in the course of our literature review, 109 articles have been published in conference proceedings of peer-reviewed conferences such as the *Winter Simulation Conference*, while 230 papers have been publicised in scientific journals such as the *Journal of Computational Science*. As depicted in Table 1, a variety of metrics related to social, economic, and

environmental sustainability has been investigated by simulation-based research over the last decades.

Table 1: Sustainability metrics investigated in simulation-based research

Social sustainab.		Economic sustainab.		Environmental sustainab.	
Metric	Count (%)	Metric	Count (%)	Metric	Count (%)
Travel time	85 (28.6)	Costs	115 (39.7)	CO2 emiss.	101 (21.8)
Traffic density	76 (25.6)	Utilization	38 (13.1)	Energy cons.	95 (20.5)
Waiting time	34 (11.4)	Travel time	32 (11.0)	Other emiss.*	65 (14.0)
Safety (Health)	25 (8.4)	Mileage	23 (7.9)	Mileage	46 (9.9)
Modal split	20 (6.7)	Energy cons.	21 (7.2)	NOx emiss.	44 (9.5)
Service	20 (6.7)	Revenue	17 (5.9)	PM emiss.	38 (8.2)
Accessibility	15 (5.1)	Fleet size	13 (4.5)	CO emiss.	30 (6.5)
Utilization	6 (2.0)	Market share	13 (4.5)	GHG emiss.	26 (5.6)
Acceptance	5 (1.7)	Profit	5 (1.7)	Noise	7 (1.5)
Costs	5 (1.7)	Standing time	5 (1.7)	Waste	4 (0.9)
Space	4 (1.3)	Product qual.	4 (1.4)	Soil pollut.	3 (0.6)
Noise	1 (0.3)	Trip counts	2 (0.7)	Modal split	2 (0.4)
Safety (Privacy)	1 (0.3)	Waste	2 (0.7)	Ozone pollut.	2 (0.4)

*SO₂ (13), CH₄ (12), HC (8), VOC (8), N₂O (7), SO_x (5), NO₂ (4), H₂O (2), NO (2), CH (1), NH₃ (1), PO₄ (1), THC (1)

In terms of social sustainability, travel times, traffic density and congestion, as well as customer waiting times and health issues seem to be particularly important performance metrics, while customer acceptance, private costs, space restrictions, noise implications, and privacy invasion have barely been researched as criteria for social issues. In turn, economic sustainability is often assessed by means of various cost factors (e.g., investment costs; Tan et al. 2009), asset utilization, and travel times or mileages of the operating transportation fleet, whereas current research falls short on economic performance metrics such as profits, vehicle standing times, product quality, trip counts, and waste. Finally, environmental sustainability is commonly evaluated in terms of CO₂ emissions, energy consumption, mileage, NO_x emissions or a combination of different emission factors such as SO₂, CH₄, HC, VOC, N₂O, SO_x, NO₂, or H₂O. In contrast, few simulation studies have focused on quantifying transport-related effects on noise, waste, soil pollution, modal split or ozone pollution.

Looking at Figure 1, it becomes obvious that the scholarly interest in sustainability metrics in the transportation domain has grown substantially over the recent years. While between 1996 and 2000 only one publication each assessed the social and economic impacts in the transportation sector, this number has steadily increased until 2020. Nowadays, the majority of simulation-based research even focuses on metrics related to environmental and social sustainability, indicated the increasing importance of these dimensions. Further, based on the given data, it can be predicted that the total number of publications for 2021-2025 will increase again compared to 2016-2020.

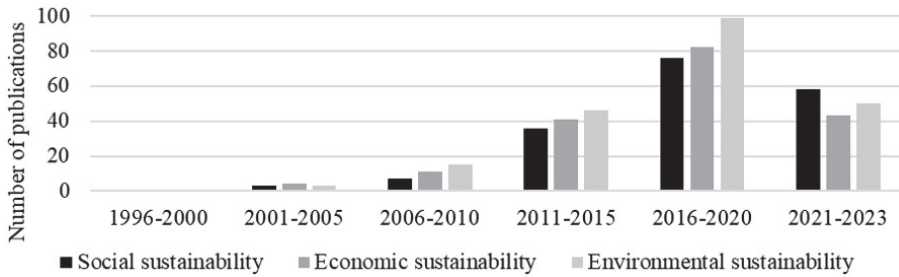


Figure 1: Simulation studies on sustainability metrics per year (339 articles total)

Referring to the specific use of individual simulation methods for the assessment of different sustainability metrics, we have conceptualized our findings based on the classifications proposed by Beese et al. (2019) and Jahangirian et al. (2010), who distinguish the following simulation techniques: Agent-based Simulation (ABS), Analytical Simulation (AS), Artificial Neural Networks (ANN), Discrete-event Simulation (DES), Hybrid Simulation (HS), Microsimulation (i.e. traffic simulation) (MI), Monte Carlo simulation (MC), Spreadsheet Simulation (SP), and System Dynamics (SD). In this context, Table 2 provides an overview of the most common simulation methods for each of the identified sustainability metrics. Regarding social sustainability metrics, ABS appears to be a popular method for investigating customer acceptance, modal choices, service levels, space implications and utilization effects, while microsimulation is primarily used to assess noise levels, privacy concerns, traffic congestions, as well as travel and waiting times. For economic metrics, ABS is often used to evaluate costs, fleet size, market share, mileage, travel time and utilization, while AS is commonly employed for studies related to energy consumption, mileage and product quality. In turn, DES generally refers to market share, revenue, standing time, travel time or waste metrics. Yet again, MI studies frequently deal with fleet size and trip counts as major economic indicators. Ultimately, environmental metrics such as emissions (e.g., CO₂, NO_x) are commonly assessed by means of AS and MI, while mileages and waste volumes are evaluated more often via ABS. Modal choices are exclusively studied by AS, whereas more specific metrics like ozone and soil pollution are predominantly subject to studies leveraging HS, MI, or MC.

Figure 2 synthesizes the share of simulation studies that focus on urban, sub-urban, rural, or mixed transportation settings (left side), and highlights the portion of publications with different geographical scope.

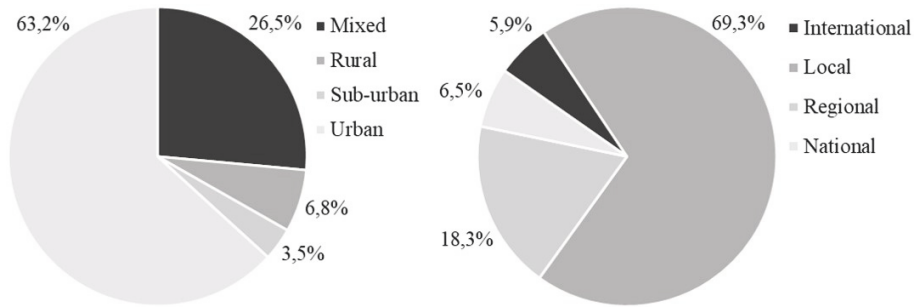


Figure 2: Setting (left) and scope (right) of transportation activities studied

Finally, Figure 3 shows the composition of transportation types (i.e., freight) across the three sustainability dimensions for different transportation modes based on their relative proportions. Here, for example, we can observe that multimodal transportation modes are investigated in terms of both, social, economic, and environmental sustainability as well as freight, people, and mixed transportation.

Table 2: Assessed sustainability metrics by simulation method

	ABS	AS	ANN	DES	HS	MI	MC	SP	SD
Acceptance	60%	0%	0%	20%	0%	20%	0%	0%	0%
Accessibility	7%	7%	7%	27%	13%	33%	7%	0%	0%
Costs	20%	20%	0%	0%	20%	0%	0%	0%	40%
Modal split	40%	40%	0%	0%	0%	10%	5%	0%	5%
Noise	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Safety (Health)	20%	16%	4%	4%	4%	36%	8%	0%	8%
Safety (Privacy)	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Service	35%	15%	0%	10%	5%	20%	10%	0%	5%
Space	50%	0%	0%	0%	0%	25%	25%	0%	0%
Traffic density	25%	16%	0%	5%	4%	38%	3%	1%	7%
Travel time	15%	12%	0%	12%	3%	53%	4%	0%	3%
Utilization	33%	0%	0%	33%	0%	0%	17%	0%	17%
Waiting time	24%	9%	0%	15%	6%	33%	9%	0%	3%
Costs	21%	5%	1%	19%	4%	14%	11%	0%	4%
Energy cons.	0%	41%	0%	5%	5%	23%	9%	0%	18%
Fleet size	38%	15%	0%	15%	8%	0%	23%	0%	0%
Market share	23%	15%	0%	31%	8%	0%	15%	0%	8%
Mileage	27%	32%	0%	14%	9%	0%	18%	0%	0%
Product quality	0%	67%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	0%
Profit	20%	20%	0%	20%	0%	0%	20%	0%	20%
Revenue	18%	18%	0%	29%	0%	18%	6%	0%	12%
Standing time	20%	0%	0%	60%	0%	20%	0%	0%	0%
Travel time	21%	18%	0%	32%	4%	14%	7%	0%	4%
Trip counts	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Utilization	29%	12%	0%	26%	6%	6%	12%	3%	6%

	Waste	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Environmental	CO emiss.	10%	27%	0%	20%	0%	37%	3%	0%	3%
	CO ₂ emiss.	12%	20%	0%	17%	4%	28%	6%	2%	11%
	Energy cons.	17%	28%	2%	12%	3%	27%	6%	2%	2%
	GHG emiss.	19%	23%	0%	8%	4%	23%	15%	4%	4%
	Mileage	33%	17%	2%	13%	2%	11%	13%	0%	9%
	Modal split	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Noise	14%	29%	0%	0%	14%	29%	14%	0%	0%
	NO _x emiss.	9%	20%	0%	11%	0%	43%	7%	0%	9%
	Other emiss.	6%	28%	1%	22%	3%	27%	7%	0%	4%
	Ozone pollut.	0%	50%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%
	PM emiss.	18%	18%	0%	11%	3%	34%	8%	0%	8%
	Soil pollut.	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	0%	0%
	Waste	50%	0%	0%	0%	0%	25%	25%	0%	0%

On the contrary, electric bicycles have only been investigated in terms of economic and environmental performance metrics for mobility (i.e., transportation of people) systems, while research on electric trucks is scarce concerning social performance implications and logistics (i.e., transportation of freight) systems.

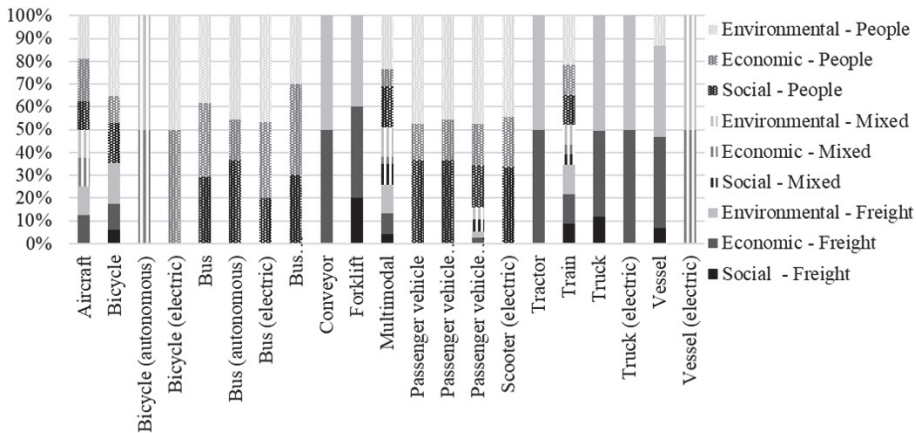


Figure 3: Type and mode of transportation by sustainability dimension

For the entire list of publications that has been reviewed for this study, please refer to the following DOI: [10.21227/q3ek-sp50](https://doi.org/10.21227/q3ek-sp50)

5 Conclusion

This study conducted an extensive literature review on publications that employed computer simulation to assess sustainability metrics in the transportation domain. We screened a total of 339 relevant articles and identified 39 commonly employed performance metrics across the three sustainability dimensions. Our study has shown, that sustainability metrics have become increasingly important in simulation research over the last decades, with social sustainability, comprising performance metrics such

as travel times or traffic density, being the most prominent dimension within recent years. By linking simulation methods with sustainability metrics, our study provides a valuable foundation for future research when it comes to planning and conducting simulation-based research on sustainability issues. Furthermore, it identifies research trends and gaps in the transportation domain based on various side constraints such as transportation setting, transportation scope, or transportation mode and can be used to detect fruitful areas for future simulation-based sustainability research. Overall, our study contributes towards a better understanding on the use of simulation for quantifying or evaluating sustainability-related implications in the public and private transportation sector, which can support future research in developing more rigorous and efficient simulation models. Moreover, it aids decision- and policy-makers by providing guidelines and orientation regarding the choice of relevant key performance indicators for measuring sustainability of certain transport modes, which is likely to benefit the planning of more sustainable mobility and logistics concepts in the future.

References

- Auf der Landwehr, M.; Trott, M.; Viebahn, C. von: Waste of Time and Money? Constructing an Applicability Framework for Organizational Use of Simulation Studies and Digital Twins. In: Proceedings of the 41st International Conference on Information Systems (ICIS), Hyderabad (India), 13th-16th December 2020.
- Bae, K.; Mustafee, N.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, L.: Hybrid modelling of collaborative freight transportation planning using agent-based simulation, auction-based mechanisms, and optimization. *SIMULATION* 98 (2022) 9, pp. 753–771.
- Basaric, V.; Djoric, V.; Jevdjenic, A.; Jovic, J.: Efficient Methodology for Assessment of Targets and Policy Measures for Sustainable Mobility Systems. *International Journal of Sustainable Transportation* 9 (2015) 3, pp. 217–226.
- Beese, J.; Haki, K.; Aier, S.; Winter, R.: Simulation-Based Research in Information Systems. *Business & Information Systems Engineering* 61 (2019) 4, pp. 503–521.
- Ben-Dor, G.; Ogulenko, A.; Klein, I.; Benenson, I.: Modal Shift and Shared Automated Demand-Responsive Transport: A Case Study of Jerusalem. *Procedia Computer Science* 201 (2022), pp. 581–586.
- Burinskiene, A.; Lorenc, A.; Lerher, T.: A Simulation Study for the Sustainability and Reduction of Waste in Warehouse Logistics. *International Journal of Simulation Modelling* 17 (2018) 3, pp. 485–497.
- Fan, Y.; Kleuver, C. de; Leeuw, S. de; Behdani, B.: Trading off cost, emission, and quality in cold chain design: A simulation approach. *Computers & Industrial Engineering* 158 (2021), pp. 1–16.
- Hatzivasilis, G.; Soultatos, O.; Ioannidis, S.; Spanoudakis, G.; Katos, V.; Demetriou, G.: MobileTrust: Secure Knowledge Integration in VANETs. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems* 4 (2020) 3, pp. 1–25.
- Hu, W.; Dong, J.; Hwang, B.; Ren, R.; Chen, Y.; Chen, Z.: Using system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: A case study of Beijing. *Sustainable Cities and Society* 53 (2020), 101923.
- Jahangirian, M.; Eldabi, T.; Naseer, A.; Stergioulas, L.; Young, T.: Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research* 203 (2010) 1, pp. 1–13.

- La Torre, R. de; Corlu, C.; Faulin, J.; Onggo, B.; Juan, A.: Simulation, Optimization, and Machine Learning in Sustainable Transportation Systems: Models and Applications. *Sustainability* 13 (2021) 3, pp. 1–21.
- Leidner, D.: Review and Theory Symbiosis: An Introspective Retrospective. *Journal of the Association for Information Systems* 19 (2018) 6, pp. 552–567.
- Linares, M.; Barceló, J.; Carmona, C.; Montero, L.: Analysis and Operational Challenges of Dynamic Ride Sharing Demand Responsive Transportation Models. *Transportation Research Procedia* 21 (2017), pp. 110–129.
- Litman, T.; Burwell, D.: Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues* 6 (2006) 4, pp. 331–347.
- Menendez, M.; Ambühl, L.: Implementing Design and Operational Measures for Sustainable Mobility: Lessons from Zurich. *Sustainability* 14 (2022) 2, 625.
- Mikušová, N.; Fedorko, G.; Molnár, V.; Hlatká, M.; Kampf, R.; Sirková, V.: Possibility of a Solution of the Sustainability of Transport and Mobility with the Application of Discrete Computer Simulation—A Case Study. *Sustainability* 13 (2021) 17, 9816.
- Muller, M.; Park, S.; Lee, R.; Fusco, B.; Correia, G.: Review of Whole System Simulation Methodologies for Assessing Mobility as a Service (MaaS) as an Enabler for Sustainable Urban Mobility. *Sustainability* 13 (2021) 10, pp. 1–15.
- Sayyadi, R.; Awasthi, A.: A simulation-based optimisation approach for identifying key determinants for sustainable transportation planning. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* 5 (2018) 2, pp. 161–174.
- Stark, J.; Weiß, C.; Trigui, R.; Franke, T.; Baumann, M.; Jochem, P.; Brethauer, L.; Chlond, B.; Günther, M.; Klementschtz, R.; Link, C.; Mallig, N.: Electric Vehicles with Range Extenders: Evaluating the Contribution to the Sustainable Development of Metropolitan Regions. *Journal of Urban Planning and Development* 144 (2018) 1, 04017023.
- Tan, K.; Ahmed, M.; Sundaram, D.: Sustainable warehouse management. In: Barjis, J.; Kinghorn, J.; Ramaswamy, S. (Eds.): *Proceedings of the International Workshop on Enterprises & Organizational Modeling and Simulation*, Amsterdam (Netherlands), June 08th–09th June 2009, pp. 1–15.
- Tomás, R.; Fernandes, P.; Macedo, J.; Coelho, M.: Carpooling as an Immediate Strategy to Post-Lockdown Mobility: A Case Study in University Campuses. *Sustainability* 13 (2021) 10, pp. 1–22.
- Waisman, H.; Guivarch, C.; Lecocq, F.: The transportation sector and low-carbon growth pathways: modelling urban, infrastructure, and spatial determinants of mobility. *Climate Policy* 13 (2013) sup01, pp. 106–129.
- Webster, J.; Watson, R.: Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *Management Information Systems Quarterly* 26 (2002) 2, pp. xiii–xxiii.
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Ed.): *Fachwissen Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2018, pp. 1–34.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Development of a Pull Concept with a Simulation Model for the Start-up Phase of a Fuel Cell Series Production

Entwicklung eines pull-Konzepts mittels eines Simulationsmodells zur Betreuung der Anlaufphase der Serienfertigung von Brennstoffzellen

Oliver Brützel, Pascal Werz, Leonard Overbeck, Marvin Carl May, Gisela Lanza
wbk Institute of Production Science, Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Karlsruhe (Germany), oliver.bruetzel@kit.edu;

Abstract: As technology advances, alternatives to the internal combustion engine, such as battery and fuel cell-driven electric mobility, are becoming increasingly attractive. Sustainable propulsion by battery has already been widely researched and is being mass-produced. The fuel cell, on the other hand, is not yet being produced to the same extent. To develop the fuel cell into a serious competitor to the battery, its series production must be targeted to further reduce costs. In addition, the increasing demand for fuel cells can only be satisfied through series production. For the flexible use of fuel cells in buses, trucks, and cars, production with a wide range of variants is also necessary. For the conception of series production, a realistic simulation of the material flow is an important component. This paper presents an approach for an intelligent pull concept to decouple material flow and at the same time reduce setup cost.

1 Introduction

Fuel cell technology is considered one of the most promising technologies being developed in line with the increasing renewable energy supply. The use of fuel cells eliminates the pollution caused by the combustion of fossil fuels since the only by-product is water. In addition, they do not rely on conventional fuels such as oil or gas and can therefore eliminate economic dependence on politically unstable countries. Fuel cell systems have the highest efficiency compared to conventional distributed energy systems and can produce almost zero greenhouse gas emissions when operating with renewable, clean resources (Wilberforce et al., 2016).

The fuel cell market is growing every year (Das et al., 2017). To meet this demand, companies must produce fuel cells more economically. This paper serves as a support

for companies in the start-up phase of the series production of fuel cells. Practical cooperation is carried out with an industry partner.

The work extends an existing model by a higher level of detail, by a greater practical relevance and by the multi-variant case. The approach will be modelled according to the principle of pull control. The simulation model will be used to conduct experiments that optimize the output quantity through pull control concepts. Special attention will be paid to the order allocation and the minimization of the accumulated setup times, under different demand scenarios by using genetic algorithms. Experiments are also being conducted to see how the output changes when the developed order control is implemented in upstream stations such as stamping.

2 Literature Review

Dyckhoff et al. (2012) looks at the current research landscape on series production ramp-ups from the perspective of production theory. Progressive learning effects of the personnel, induced technical progress on the machines, initial lack of mastery of production quality and varying production intensity in operationalizing the ramp-up policy form the essential characteristics of the production start-up. Existing models are examined to determine the extent to which they are able to depict the empirical phenomenon of production ramp-up outlined in this way. By reverting to and concretizing individual elements of these models and adding further considerations, a lean, dynamic basic model of the production ramp-up is developed in the tradition of Gutenberg's production theory, which is able to explain the ideal-typical course of the start-up curve solely on the basis of the features mentioned.

The integration of series production ramp-up planning and scheduling strategies is a critical aspect of modern manufacturing systems. Many researchers have explored different methods and algorithms for optimizing the scheduling and ordering process in manufacturing systems, with the ultimate goal of minimizing the total cost of production and inventory while maximizing the system's throughput. In recent years, there has been an increasing focus on the integration of pull-control mechanisms

Chou and Huang (2013) propose a novel method for integrating machine scheduling and self-healing maintenance in manufacturing systems using job-mix pull control. Their approach aims to optimize system performance by dynamically adjusting the mix of jobs processed based on machine status and maintenance needs while proactively monitoring machines for failures. Simulations show that their method outperforms other scheduling and maintenance strategies in terms of system throughput and machine utilization. Ni et al. (2013) present a mathematical model to optimize scheduling and ordering processes in manufacturing systems with delayed differentiation. Their model considers production capacity, order demand, and inventory costs to minimize the total cost of production and inventory. A heuristic algorithm is proposed to efficiently find a solution to the optimization problem. The effectiveness of the proposed model and algorithm is demonstrated through a case study. Lee et al. (2002) conduct an experimental study on scheduling algorithms for semiconductor fabrication lines. They propose two algorithms and compare them to a baseline First-Come-First-Serve algorithm based on several performance metrics. The input scheduling algorithm outperforms the other two algorithms in terms of cycle time and throughput, while the bottleneck scheduling algorithm performs the best in reducing work-in-process inventory. The authors conclude that the choice of

scheduling algorithm should depend on specific objectives and constraints. Tošanović & Štefanić (2022) investigate the effects of pull control mechanisms on lead time under different production conditions. Simulation experiments are conducted to analyse and compare how different mechanisms affect lead time, with focused parameters of process variability, operating time, and the presence of bottlenecks. Results show that optimal pull control mechanisms vary for different production conditions. However, only single-product production was investigated in this study.. Kaiser et al. (2019) investigate pull control and the multi-variant case. The goal is to implement dynamic value stream simulation through a modular system. The advantages of a material flow simulation are the capture of dynamic processes and the quantitative detection of optimization potentials. In this approach, standard modules have been developed in Plant Simulation from Siemens. These standard modules allow for variant manufacturing, the implementation of pull and push control, and the use of kanban control. Kaiser et al. (2019) perform a variant-specific determination of the process times to capture the multiple influences and interactions of the variants. For this, it is necessary to determine in which way the customer cycle is represented by the different variants. The result is a variant-specific processing time for each process step (Kaiser et al. 2019).

In the following approach, the different process levels are decoupled by implementing a high-rack warehouse. Such an approach makes sense, for example, if lot sizes at the different process stages do not have a meaningful smallest common divisor (e.g., due to roll-to-roll processes). Despite the advancements in manufacturing systems proposed in the literature, there is a lack of research on how to reduce setup times in manufacturing processes with a high-rack warehouse. The studies by Chou & Huang (2013), Ni et al. (2013), Lee, Park & KIM (2002), Tošanović and Štefanić (2022), and Kaiser et al. (2019) give us meaningful ideas on optimizing scheduling and control mechanisms but have not considered the use of high-rack warehouse and reactive control to reduce setup times. Therefore, there is a research gap in investigating the effectiveness of reactive control in high-rack warehouse systems to minimize setup times and improve manufacturing system performance.

3 A detailed multi-variant Approach

The approach is used to implement a discrete-event simulation model of fuel cell production in which pull control and the multi-variant case are applied. To reduce costs for fuel cell production, a key factor will be, if the highly heterogeneous needs for different car purposes can be produced efficiently in one production system to ensure the utilization of the highly expensive machines. This can only be achieved by an intelligent pull system. For production to work according to the pull principle, a supermarket is created at a defined interface between production and the customer. This stores parts and places an order to a defined predecessor. Suppliers are warehouses, sources, or other supermarkets. Along the production line, other supermarkets are implemented and configured with the materials and their corresponding minimum, maximum and initial stocks, as well as the suppliers. The intermediate products are stored centrally in a high-rack warehouse. If the stock of a product in the high-rack warehouse falls below the minimum stock level, this product is ordered in the corresponding upstream stations. As a result, pull control in production is created by the supermarket at the customer interface ordering new parts

from the high-rack warehouse, which then orders its new parts from an upstream supermarket, and so on.

For the simulation model to simulate the production of multiple variants of fuel cells, the variants must first be generated. These distinctions enable realistic simulation, the implementation of setup changes, and the modelling of assembly and disassembly list changes. The next step is to optimize the model.

The approach pursues the goal of maximizing throughput by reducing cumulative setup time. This goal is achieved through intelligent automated job assignments. A certain amount of orders is collected in an order warehouse. The implemented control system assigns each machine the job for which it is set up. This is done until the control system concludes that a machine needs to be retooled. For this purpose, the predicted orders in the order warehouse are compared with the set-up of the machines. The principle of control is shown in Figure 1.

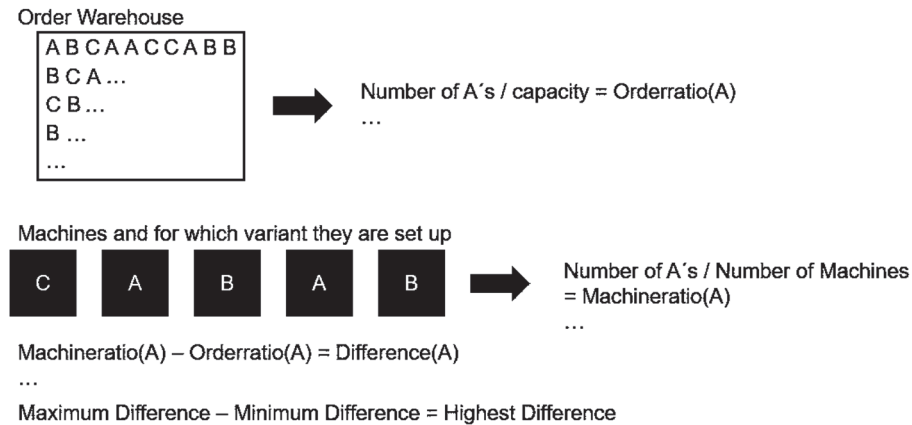


Figure 1: Principle of the intelligent automatic control

In the order warehouse, the ratio is evaluated in which the orders of the different variants are present. At the same time, the number of machines set up for each variant is evaluated. This value is set to the total number of machines. The ratios of each variant are compared. The highest value of the difference values is stored in the variable *Maximum Difference* and the lowest difference value is stored in the variable *Minimum Difference*. If the value of the variable *Highest Difference* is greater than a fixed value, the command to change over is given. A machine that is set up for the variant with the highest differential value is scaled down and set up for the variant with the lowest differential value. The meaning behind this method is that it is an intelligent control, which automatically determines when a machine should change over to which variant. The changeover command must be dependent on a fixed value. The value can be optimized, for example by an algorithm. This allows the order assignment to be optimized.

The approach was tested on a use case of the industry partner. The verification of the automated intelligent order assignment was performed through several experiments.

4 Use Case

The approach from Chapter 3 was applied in practice in collaboration with an industry partner. The industry partner would like to use this approach to optimize the large-scale production of high-performance fuel cell stacks. The software used for the practical application is Plant Simulation.

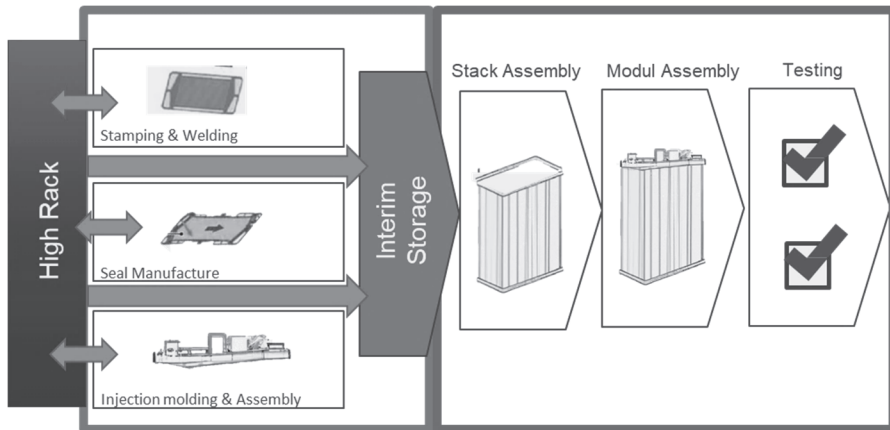


Figure 2: material flow fuel cell production

The own approach is implemented as described above according to the process steps shown in Figure 2. Basic decisions are made in coordination with the industry partner. The interface of production with the customer is to be implemented in the stack assembly. This means that the stack assembly produces the appropriate variant of the fuel cell stack depending on the customer's order. The upstream processes of the stack assembly are controlled according to the pull principle. The downstream processes are controlled according to the push principle. The interface to the customer is simulated by a source that generates production orders. In this practical example, production can view 100 orders in advance. This is modelled by an order warehouse with a capacity of 100. Using an intelligent order control in the outbound control of the order warehouse, the orders are distributed to the stack assemblies. When an order leaves the order warehouse, a new order enters the order warehouse. The order control aims to minimize the waiting times and the accumulated setup times of the stack assemblies. This maximizes the working time and output quantity of the assembly stations. Stack assembly pulls the materials needed for assembly from a supermarket. In this practical example, the intermediate products are stored centrally in a high-rack warehouse. If the stock of an intermediate product falls below the minimum stock level during stack assembly, this intermediate product is ordered from the high rack warehouse. If the stock of a product in the high rack warehouse falls below the minimum stock level, this product is ordered in the corresponding upstream stations. As a result, the intermediate products are produced according to the pull principle.

For the simulation model to simulate the production of multiple variants of fuel cells, the variants must first be generated. In this practical example, three different variants

are produced after consultation with the industry partner. These distinctions enable the realistic simulation, the implementation of setup changes and the modelling of assembly and disassembly list changes.

5 Results

In the following of this Chapter, different experiments are analysed and their results are presented. The experiments were carried out in cooperation with the industry partner. The practical example includes the optimization of concrete production. The focus of the optimization was the creation of an intelligent automated order allocation. The goal here was to minimize the accumulated setup times and maximize the output quantity. The presented intelligent automated controls are optimized and applied in simulation in the following. The developed methods are tested for their robustness to changing levels. In addition, the comparison of the developed controls to predefined order assignments in Plant Simulation is drawn.

The output control *min. setup time* is used as the present comparison control. With the output control *min. setup time*, the movable elements are distributed to the successor, which station means the shortest setup time for the movable elements to be distributed. This is only possible if several successors are ready to take up a movable element and the output control has the choice between them. If only one successor is ready to pick up a movable element, the movable element that stays the longest in the order warehouse is allocated to this successor, regardless of the setup time. The output control *min. setup time* operates according to the FIFO principle. The goal is an intelligent automated order allocation, resulting in an optimal distribution of orders, independent of the order situation and levelling. For this reason, the experiments of the different controls were additionally carried out with three different order levellings. First, a *random* levelling was chosen, which is closest to practice. The second-order levelling used corresponds to a *change in every 10* elements. In this order list, ten fuel cells of *variant A*, then ten fuel cells of *variant B*, and then ten fuel cells of *variant C* are ordered consecutively and entered into the system. The third type of levelling, the *change every 1000* elements, is based on the same principle as the *10-cell change*. The difference is that 1000 units of a variant fuel cell are ordered consecutively. The orders are realized in Plant Simulation via a source, which generates the movable elements based on an order list. The following experiment and optimization of the control in the stack assembly were carried out in an extra model. First, the required part of the stack assembly was extracted from the complete model of the factory. The stack assembly was supplied directly from sources in the extra model. This meant that there was no supply bottleneck. The extraction was carried out for performance reasons. Better measurability of the influence of the accumulated setup times on the overall performance could be achieved. The goal of the extracted model was an investigation of the stack assembly. The minimization of influencing factors on the overall result, adds up to a better understanding of which influencing factors affect the result and how. Eliminating all influencing factors of stack assembly delivery improved the knowledge of how different controls affected cumulative setup times and output.

Before the stack assembly experiments could be conducted, a fixed value was assigned to the variable *SetupDiff*. As described in Chapter 3, the fixed value *SetupDiff*

determines when a stack assembly should change over. To determine the optimal value, a genetic algorithm was performed.

Figure 3 compares the results of the different experiments in percentage terms. As a standard scenario, the control min. setup time with the levelling random was chosen. The method *order assignment stack assembly* is robust against changes in order levelling. With levelling *change every 1000*, there is hardly any difference in the output of the different order assignment options. This is because this principle of levelling requires hardly any changeover operations. After all, the system is fed with only one variant at a time for a long time. As a result, the type of order assignment is of little importance. For the other two levellings, the output increases strongly as soon as the developed control order assignment stack assembly is used instead of the control *min. setup time*. In the case of *random* levelling, the output quantity increases by 28.31%, and in the case of *change every 10* levelling, the output quantity increases by 31.99%. The increase in output can be explained by two effects. On the one hand, with the order assignment stack assembly, a control system was developed that intelligently distributes the orders and minimizes accumulated setup times. Secondly, the developed order allocation did not use the FIFO principle. This means that orders can be collected and the control has a larger selection of orders that it can distribute intelligently to the free machines.

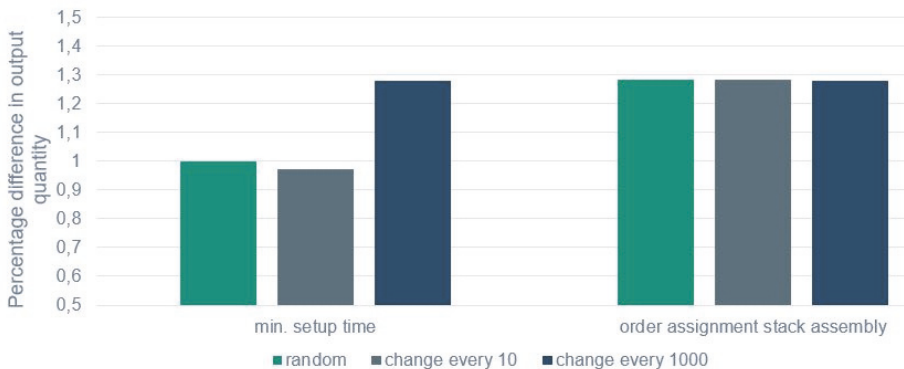


Figure 3: Percentage difference in the stack assembly output

The control of stack assembly was transferred to the overall factory model. This shifted the bottleneck of production to the upstream processes. To optimize the order assignment of the upstream processes, various experiments were carried out in the overall model. In these experiments, the control described in Chapter 3 was also used for upstream stations. The experiments of the following results were carried out in the overall model. The order levelling, which is fed into the stack assembly, and the control of the order assignment of the stamping stations were changed. Figure 4 shows the percentage difference in the output of the overall model with the above changes. Because an upstream process is studied in the experiments, which only produces when needed, the potential for improvement is limited. The fluctuations in the output are therefore not as high as in the experiments with stack assembly.

An increase in output can be seen when changing the *min. setup time* control to the *order assignment stamping* control. This increase in output is independent of the order levelling at about 2%. On the one hand, the increase in output quantity was achieved by reducing the cumulative setup time of the stamping by 0.69%. On the other hand, the output increases when the stack assemblies have less downtime. This is achieved by the *order assignment stamping* control by having the stamping produce the variant that the stack assembly needs.

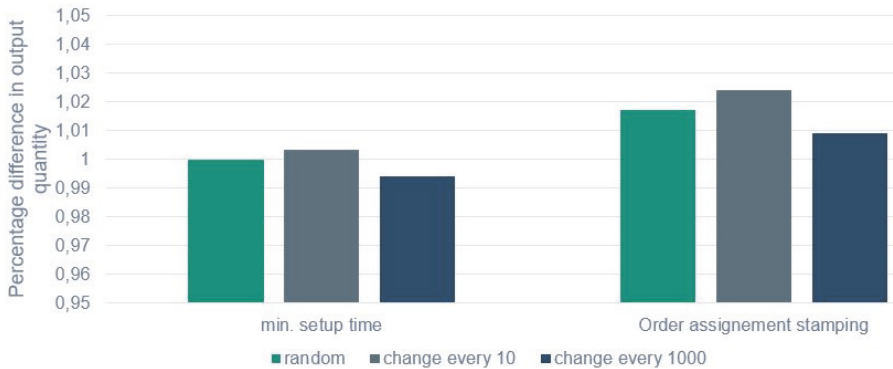


Figure 4: Percentage difference in the output of the overall model

6 Conclusion and Outlook

The task and objective of this research work was to develop an approach for converting an existing model into a realistic operational model of a higher level of detail. The development of the approach was implemented in cooperation with the industrial partner. The implementation of the optimization measures involved the implementation of the pull control and the multi-variant case. Based on this, the setup processes and the output quantity were to be investigated depending on different order levels.

The approach of the present work consisted of implementing pull control by implementing supermarkets. The multi-variant production was implemented by generating multiple variants and embedding methods. In this model, an intelligent automated order assignment could be developed, which is independent of order levelling. The order assignment was created to minimise cumulative setup times and maximise output quantity. In the approach, different order assignments could be developed. When selecting the order assignment, it is important to consider at which point in production the corresponding station is located. Buffer stocks of a downstream station, for example, are important indicators for decision support in the order allocation of an upstream station. The approach was specifically applied to the start-up phase of the industrial partner's series production of fuel cells. This enabled the simulation model to be implemented realistically during operation with a high level of detail. The developed approach could then be tested in practice using experiments. The experiments showed the robustness of the developed order

allocation against different order levellings. Optimization of the output quantity as well as the accumulated setup times was achieved.

The following work can build on the presented approach to conduct further experiments. The buffer sizes of production must continue to be optimized. The number of necessary logisticians and their areas of responsibility have not been analysed and optimized in more detail. The influence of different minimum stock levels can be analysed, for example in the buffers and the high rack warehouse, on the output quantity of production.

The above-mentioned possible objectives of subsequent work are specific to the simulation model developed in cooperation with the industry partner. Due to the high level of detail of this specific production, the universal applicability of the simulation model was neglected. The results are therefore not necessarily transferable to other production sites but may provide important approaches to solving similar problems.

References

- Chou, Y.-C.; Huang, P.-H.: Integrating machine scheduling and self-healing maintenance by job-mix pull control. *International Journal of Production Research* 51 (2013) 20, pp. 6194–6208.
- Das, V.; Padmanaban, S.; Venkitusamy, K.; Selvamuthukumar, R.; Blaabjerg, F.; Siano, P.: Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017), pp. 10–18.
- Dyckhoff, H.; Müser, M.; Renner, T.: Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 82 (2012) 12, pp. 1427–1456.
- Kaiser, J.; Urnauer, C.; Reif, M.; Metternich, J.: Wertstrombasierte Erstellung von Simulationsmodellen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019) 11, pp. 715–719.
- Lee, Y.H.; Park, J.; KIM, S.: Experimental study on input and bottleneck scheduling for a semiconductor fabrication line. *IIE Transactions* 34 (2002) 2, pp. 179–190.
- Ni, Y.; Wang, Y.; Yao, J.; Li, J.: Integrated optimisation of scheduling and ordering based on semi-finished goods delayed differentiation. *International Journal of Production Research* 51 (2013) 16, pp. 4805–4819.
- Tošanović, N.; Štefanić, N.: Evaluation of Pull Production Control Mechanisms by Simulation. *Processes* 10 (2022) 1, pp. 5.
- Wilberforce, T.; Alaswad, A.; Palumbo, A.; Dassisti, M.; Olabi, A.G.: Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016) 37, pp. 16509–16522.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Transportsimulation für eine nachhaltige, resiliente und qualitätserhaltende Holzlogistik

Transport Simulation for Sustainable, Resilient, and Quality-preserving Wood Logistics

Christoph Kogler und Peter Rauch, Universität für Bodenkultur Wien (Austria),
christoph.kogler@boku.ac.at, peter.rauch@boku.ac.at

Abstract: Wood is the renewable raw material of the future contributing strongly to a sustainable development. Climate crisis induced forest calamities such as windstorms followed by insect infestations challenge wood supply chain management. To fulfil increasing production amounts sustainable, resilient, and quality-preserving wood logistics is needed. Discrete event simulation provides an excellent methodology for a digital representation of wood supply chains focusing on straightforward business processes. Further strengths in facilitating stakeholder participation and establishing credibility through visualization and animation enable the implementation of quantitative decision support for researchers, students, and stakeholders of wood supply chains. Consequently, unique models for unimodal, multimodal, and multi-echelon unimodal wood transport are presented, which enable multicriteria-based strategy development, optimal fleet configurations, and wood quality preservation in challenging scenarios. The presented models were applied in scientific, educational, and managerial settings and set the stage for knowledge transfer in serious-game-based workshops, advanced risk management, and contingency planning.

1 Motivation, Forschungsfragen und Simulationsbezug

Welt-, europa- bzw. österreichweit sind 31%, 43% bzw. 48% der Landfläche mit Wäldern bedeckt, deren Bäume und Ökosysteme entscheidende Beiträge zur Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals), dem Pariser Klimaschutzübereinkommen sowie den Aichi-Biodiversitätszielen ermöglichen (FAO 2018). Die österreichische Holzwertschöpfungskette beschäftigt in 172.000 Unternehmen 300.000 Menschen und erzielt eine positive Handelsbilanz von mehr als drei Mrd. USD (FHP 2019). Die große Bedeutung und starke Exportorientierung zeigen sich u.a. in weltweiten Top-3-Platzierungen bei Holzexportwert pro Landesfläche bzw. pro Kopf (FMA 2022, ITC 2023). Aktuelle Herausforderungen entlang dieser und internationaler Holzlieferketten beinhalten

immer häufigere und schwerwiegendere Forstkalamitäten wie Stürme, Brände, Schneedruck, Eisbruch und Insektenbefall. Zudem bestehen gravierende Engpässe an forstlichen Kran-LKW-Fahrerinnen und Fahrern sowie Ineffizienzen aufgrund geringer Kooperationsbereitschaft beim Datenaustausch und fehlender datenbasierter Entscheidungsunterstützung der konservativ agierenden Akteure dieser Branche.

Um die Nachfrage nach diesem erneuerbaren Rohstoff in Zeiten von Klimakrise, Versorgungsengpässen und Lieferkettenunterbrechungen decken zu können, bedarf es innovativer Weiterentwicklungen des traditionellen Holzlieferkettenmanagements. Entscheidend ist hierfür eine nachhaltige, resiliente und qualitätserhaltende Holzlogistik, die durch Beantwortung der folgenden Forschungsfragen vorangetrieben wird:

1. Wie können unimodale und multimodale Transportstrategien für eine grünere und widerstandsfähigere Holzversorgung in Risikoszenarien virtuell getestet werden und welche Möglichkeiten ergeben sich dadurch für die Notfallplanung?
2. Welche Potentiale ergeben sich durch den Holzumschlag von Kran-LKWs auf Sattel-LKWs und wie sieht eine die optimale Flottenkonfiguration für diesen zweistufigen unimodalen Holztransport aus?
3. Wie beeinflusst die Beschaffungsdurchlaufzeit (Leadtime vom Zeitpunkt der Holzernte bis zum Eintreffen des Holzes im Werk) den Qualitätsverlust von Holz und mit welchen Logistikstrategien kann durch proaktives Risikomanagement ein drohender Wertverlust vermieden werden?

Wir definieren den für die Holzwertschöpfungsketten- bzw. Holzlogistikforschung neuen Begriff der Widerstandsfähigkeit bzw. Resilienz von Holzlieferketten:

„Resilienz ist die Anpassungsfähigkeit der kooperativ handelnden Akteure der Holzwertschöpfungskette, um Krisen durch Risikomanagement (analysieren und vorbereiten), Notfallplanung (entscheiden und handeln) und Wissensmanagement (reflektieren und lernen) zu überstehen, mit dem Ziel, nach der Krise einen wirtschaftlich, ökologisch und sozial nachhaltigeren Zustand zu erreichen.“

Die diskrete ereignisbasierte Simulation (DES) ermöglicht die realitätsnahe, digitale Abbildung von Holzlieferketten und deren quantitative Analyse in Szenarien auf Basis von Kennzahlen. Durch ihre Stärken bei der Integration von stochastischen Elementen, komplexen Wechselwirkungen, Zeitdynamiken und engpassbedingter Warteschlangenbildung sowie insbesondere bei der Einbindung von Expertinnen und Experten aus der Praxis (u.a. durch intuitive auf Geschäftsprozessen basierende Strukturen, Visualisierung, Animation und Was-Wäre-Wenn-Analysen) ist die DES eine ideale Methode zur Beantwortung der aufgeworfenen Forschungsfragen. Daher bietet die Vorstellung aktueller Veröffentlichungen zusammen mit neuesten Erkenntnissen laufender Forschungstätigkeiten aus dem Bereich der Holztransportsimulation einen engen Bezug zur Nachhaltigkeit in Produktion und Logistik sowie zu nachhaltigen Mobilitätskonzepten, Transport und Lieferketten.

Der klassischen Struktur folgend führt der zweite Abschnitt in das Anwendungsfeld ein und verweist auf relevante wissenschaftliche Literatur zur weiteren Vertiefung. Im dritten Abschnitt werden drei Holztransportsimulationsmodelle vorgestellt und deren Eignung für *serious game-based workshops* beschrieben. Der abschließende Abschnitt zieht ein Fazit der Einsatzpotentiale der präsentierten Modelle für die Strategieentwicklung, Notfallplanung und das Risikomanagement und weist auf zukünftige Weiterentwicklungsmöglichkeiten hin.

2 Stand der Forschung im Anwendungsfeld

Die Holzlogistikette ist ein komplexes, dynamisches Netzwerk von Material-, Dienstleistungs-, Informations- und Finanzierungsströmen zwischen und innerhalb zahlreicher Akteure. Zu diesen zählen Waldbesitzende, Behörden, Interessensvertretungen, Forsternte-, Holzfracht- und Holzhandelsunternehmen sowie Holzverarbeitende und weiterverarbeitende Industrien. Holzverarbeitende Säge-, Zellstoff- und Papierindustrien erzeugen Massenprodukte wie Sägerundholz, Pellets, Zellstoff, Papier oder Holzwerkstoffe. Weiterverarbeitende Industrien umfassen etwa den Holz- und Möbelbau, die wiederum eine Vielzahl von Produkten mit hohem Mehrwert (z.B. Brettsperrholz, Einrichtungsgegenstände, Holzfertigteilhäuser) herstellen. Das Management von Holzlieferketten umfasst Entscheidungen zu Planung, Entwurf, Betrieb, Steuerung und Überwachung für Kultivierung, Ernte, Rückung, Transport, Lagerung, (Vor-)Verarbeitung, (Wieder-)Verwendung und das Recycling von Holz. Der Holztransport ist das Bindeglied zwischen den Systemkomponenten von Holzlieferketten. Dabei sind Kran-LKWs das grundlegende Rückgrat für den unerlässlichen Transport aus dem Forst. (Kogler 2020)

Relevante Transportarten sind in Abbildung 1 dargestellt und umfassen direkten Transport mit Kran-LKWs, zweistufigen Transport (Umschlag auf Sattelschlepper mit Rungen) und multimodalen Transport (Umschlag auf Zugwaggons mit Rungen).

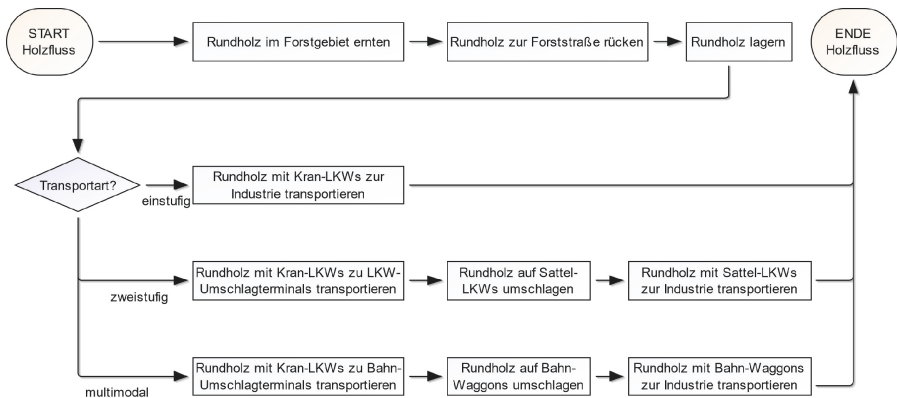


Abbildung 1: Ablauf der Holzbeschaffung

Die Methode der DES wurde in der Holzlieferkettenforschung vornehmlich von Forschungsteams aus Chile (Weintraub et al. 1996), Kanada (Mobini et al. 2013), Schweden (Eriksson et al. 2017), Finnland (Väättäin et al. 2020) und Österreich (Kogler und Rauch 2019, Kogler et al. 2020, Kogler und Rauch 2023) eingesetzt. Umfassende Überblicksarbeiten wurden von Kogler und Rauch (2018), Acuna et al. (2019) und Väättäin et al. (2021) publiziert. Dabei aufgezeigte Forschungslücken werden im Rahmen dieses Beitrags u.a. durch Vorstellung von Simulationsmodellen zur erstmaligen detailgetreuen Modellierung nachhaltigerer Transportmodi (multimodal, zweistufig) und Entwicklung resilienter Managementstrategien (Notfallplanung, Simulationsworkshops) sowie der erstmaligen Modellierung der

Holzqualitätsveränderung in Transportsimulationen und Ableitung von Logistikstrategien zum proaktiven Risikomanagement adressiert.

3 Holztransportsimulation

Die im Folgenden präsentierten Simulationsmodelle implementieren einstufige und zweistufige unimodale sowie multimodale und qualitätserhaltende Holztransportstrategien. Neben der Ableitung von wissenschaftlichen und praxisrelevanten Erkenntnissen, eignen sich die drei präsentierten DES-Modelle insbesondere für den Einsatz im Rahmen von *serious game-based workshops*, die es Akteuren der Holzlieferkette, Studierenden und Forschenden ermöglichen, neue Vorgehensweisen in Simulationsexperimenten zu erproben, ohne – aufgrund komplexer, kaum vorhersehbarer Wechselwirkungen – negative reale Auswirkungen (z.B. Kosten, Gefahren, Dauer) befürchten zu müssen (Kogler und Rauch 2020a). Dies kann u.a. in der Notfallplanung (Kogler und Rauch 2020b) und zum Benchmarking (Kogler et al. 2021) eingesetzt werden, um die Etablierung von kooperativem Lieferketten- und Risikomanagement voranzutreiben, die Resilienz zu erhöhen, die Nachhaltigkeit zu verbessern und Kosten zu sparen.

Abbildung 2 zeigt die Steuerungsansicht einer Simulation, die auf einem ursprünglich im wissenschaftlichen Kontext entwickeltem Simulationsmodell beruht. Die Simulationsapplikation wurde für die Verwendung in *serious game-based workshops* adaptiert, getestet und entsprechend des erhaltenen Feedbacks von Studierenden, Forschenden und Akteuren der Holzlieferkette mehrfach überarbeitet.



Abbildung 2: Steuerungsansicht der Simulation für *serious game-based workshops*

Die Steuerungsansicht enthält die Erntemengen für jede Region für die kommende Woche (A) sowie die Erntemengen der vergangenen Wochen (B). Darüber hinaus kann der Transportplan für die kommende Woche festgelegt werden, indem die Anzahl der Zugwaggons (1), die Anzahl der LKWs (2), die Anzahl der Verschübe pro Tag (3), die Aufteilung der Transportarten (4) und die Transportpriorität (5) definiert

werden. Nachdem die Teilnehmenden des Workshops die aktuelle Situation der Lieferkette in den Statistik-, Animations- und den Logikansichten analysiert und sich auf eine Strategie verständigt haben, werden die Entscheidungen für die kommende Woche eingetragen und die Simulation für die nächste Woche gestartet (6). Am Ende der Simulationsdurchläufe werden die Kennzahlen exportiert, mit den Teilnehmenden diskutiert und aus den Erkenntnissen Transportstrategien für die Praxis entwickelt.

3.1 Multimodaler Holztransport

Multimodale Holztransportstrategien reduzieren durch kurze Kran-LKW Transporte zu Zugterminals und anschließenden Bahntransport von Holz LKW-bedingte Umweltbelastungen (u.a. Emissionen, Lärm, Gefahren) und erhöhen die Resilienz (zusätzliche Transportkapazitäten nach Kalamitäten, Lagerkapazität am Terminal). Das multimodale Lieferkettenmanagement ist im Vergleich zu unimodalen Transporten jedoch wesentlich herausfordernder, womit das entwickelte DES-Modell ein hilfreiches Entscheidungsunterstützungswerkzeug darstellt. Die Simulation umfasst dabei einen bisher einzigartigen Detaillierungsgrad in der Modellierung von multimodalen Holzlieferketten (Acuna et al. 2019) sowie die umfangreichste Darstellung (Abbildung 3) von Kennzahlen für Kosten, Emissionen, Kapazitäten, Auslastungen, Warte- und Durchlaufzeiten in DES-Modellen für Holzlieferketten.

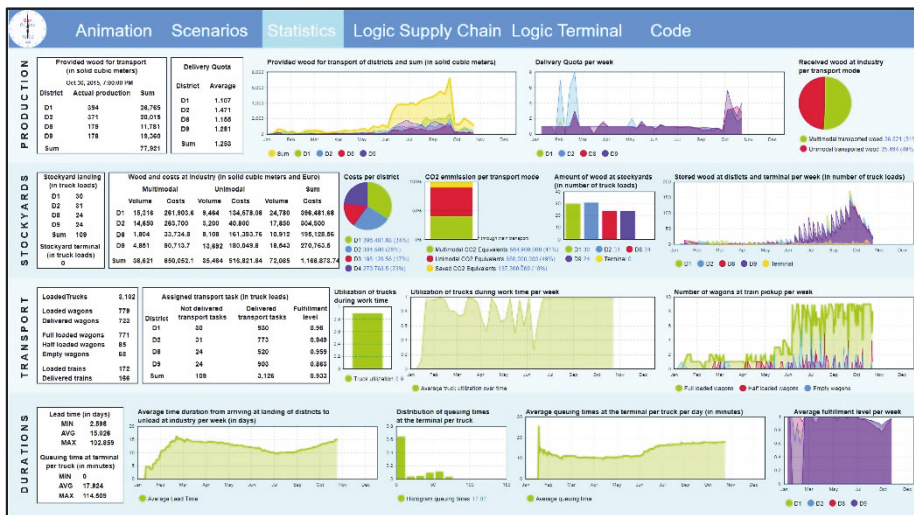


Abbildung 3: Kennzahlencockpit zur Entscheidungsunterstützung

Mit dem Simulationsmodell können Managerinnen und Manager von Holzlieferketten sowohl den Standardprozessablauf verbessern (z.B. Kapazitäts-, Auslastungs-, Zeit- und Ressourcenplanung zur Vermeidung von Engpässen) als auch neue Strategien als Reaktion auf geänderte Rahmenbedingungen (z.B. Potential zusätzlicher Bahnterminals, eingeschränkte Verfügbarkeit von Bahnwaggons) testen, bevor kostenintensive Veränderungen real implementiert werden. Zudem bietet das Simulationsmodell die Grundlage zur aktiven Notfallplanung im Schadh Holzfall (z.B. Stürme, Borkenkäfer) bzw. Vorbereitung auf Stötereignisse (z.B. Aufnahmestopps

der Industrie, Ausfall von Maschinen und LKWs) durch proaktives Risikomanagement. Um quantitative Entscheidungsunterstützung für die konkurrierenden Planungsziele zu ermöglichen, wurden zusammen mit Expertinnen und Experten aus der Praxis verschiedene Kennzahlen-Rankings entwickelt und für ein bzw. zwei Bahnverschiebe pro Tag bzw. kurze, mittlere und lange Transportdauern zum Bahnterminal analysiert. In Simulationsexperimenten wurden entscheidende Kennzahlen zur Lieferkettensteuerung wie das maximale Umschlagsvolumen, die Beschaffungsdurchlaufzeit, Wartezeiten sowie Auslastungen von Transport- und Lagerkapazitäten berechnet und übersichtlich in intuitiven Transportplanungstabellen für die in der Praxis relevanten Transportkapazitäten aufbereitet.

3.2 Zweistufiger Holztransport

Zweistufige Holztransportstrategien basieren auf kurzen Kran-LKW Transporten zu Umschlagterminals, wo in diesem Fall statt Bahnwaggons, Sattelanhänger bereitgestellt und nach Beladung durch die Kran-LKWs von Sattelschleppern abtransportiert werden. Durch das geringere Eigengewicht des Sattelzuges im Vergleich zum Kran-LKW kann Holz effizienter transportiert, sowie der drastische Engpass an Kran-LKW-Fahrerinnen und Fahrern (bedingt u.a. durch immer weniger LKW-Führerscheinschlüsse, hohe Arbeitsbelastung, Gefahr) entschärft werden.

Abbildung 4 stellt die Logik und die Interaktionen von Kran-LKWs, Sattelzügen und -aufliegern in einem Diagramm dar, das in der frei zugänglichen Softwareumgebung Bee-Up (verfügbar auf omilab.org) modelliert wurde und den Standards des Business Process Model and Notation (2.0) entspricht.

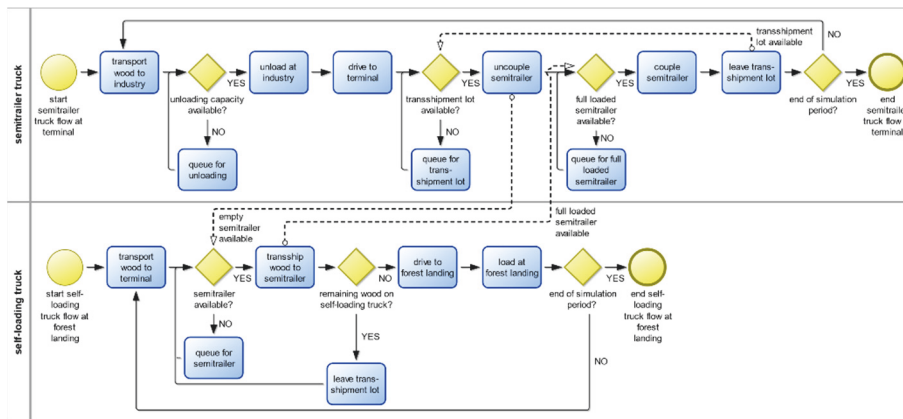


Abbildung 4: Transportprozesse von Kran-LKWs (self-loading trucks), Sattelzugmaschinen (semitrailer trucks) und -aufliegern (semitrailer)

Das zweite DES-Modell ermöglicht erstmals die simultane Optimierung der Konfiguration der Flotte (Anzahl Kran-LKWs, Anzahl Sattelaufleger, Anzahl Sattelschlepper) sowie der Umschlaginfrastruktur (Anzahl Abstellplätze für Sattelaufleger) für individuell parametrisierbare Ausgangssituationen (u.a. Distanzen, Kosten, Mengen). Dafür wurde der Lösungsraum auf die den jeweiligen Transportkapazitäten entsprechenden, sinnvollen Faktorenkombinationen

eingeschränkt (Entscheidungsbaum-Verfahren), sodass im verbleibenden Lösungsraum mittels eines exakten Verfahrens der kombinatorischen Optimierung (vollständiger Enumeration) die bestmöglichen Faktorenkombinationen aus den Simulationsergebnissen ermittelt werden konnten. Neben der wissenschaftlichen Aufarbeitung der Ergebnisse wurden optimale Faktorenkombinationen in Transportplanungstabellen für den zweistufigen Holztransport verdichtet. Diese ermöglichen es Managerinnen und Manager der Holzlieferkette, die für ihre jeweils gegebenen Situationen in der Praxis optimale Faktorenkombination unmittelbar abzulesen. So können diese etwa für die regional verfügbare Kran-LKW Anzahl, das optimale Verhältnis von Zugfahrzeugen und Sattelaufleger für die zur Verfügung stehende Terminalgröße oder aber für eine von Seiten der Industrie vorgegebene Abnahmemenge, das dafür benötigte Lieferkettennetzwerk (Transportdauer, Flottenkonstellation, Terminalgröße) ableiten.

3.3 Qualitätserhaltender Holztransport

Qualitätserhaltene Holztransportstrategien basieren auf dem signifikanten Zusammenhang von Beschaffungsdurchlaufzeit und Qualitätsverlust von frischem Rundholz während Lagerung und Transport (v.a. bedingt durch Pilz- und Insektenbefall). Das dritte DES-Modell beinhaltet auf lokalen Wetterdaten basierende Modelle, die die Entwicklung von Holzbläue bzw. der Borkenkäferpopulation sowie deren Auswirkung auf die Qualität und damit den Wert von im Wald gelagerten Holz abbilden. Die Animationsansicht (Abbildung 5) visualisiert die Qualitätsentwicklung von Holz entlang von einstufigen und multimodalen Lieferketten. Hierbei wird das Holzaufkommensgebiet abstrahiert in drei verschiedenen Höhen- bzw. Vegetationsstufen (links) mit den aktuellen Holzpoltern abgebildet, wobei Polter mit unverminderter Holzqualität in grün, von Abwertung Gefährdete gelb und Polter mit bereits abgewertetem Holz in rot dargestellt werden. Das Luftbild zeigt den Holzverladeterminal mit Waggonen (grau) und Kran-LKWs (rot-grau).



Abbildung 5: Animationsansicht zur virtuellen Abbildung der Holzlieferkette

Aktuell in der Praxis eingesetzte Holztransportstrategien basieren nicht auf expliziten Informationen zu konkret drohenden Holzwertverlusten und dienen daher als Benchmark-Strategien. Diese wurden anhand ausgewählter Kennzahlen (u.a., Beschaffungsdurchlaufzeit, Holzmenge mit Qualitätsverlust während der Beschaffungsdurchlaufzeit, Holzwertverlust durch Qualitätsverlust) mit den neu entwickelten Strategien, die gezielt die Prognose der Holzqualitätsentwicklung aufgrund der zu erwartenden Witterung nutzen, verglichen. Das Wissen um die Qualitätsentwicklung und die Prognose der voraussichtlichen Entwertungswoche erwies sich im Besonderen bei Transportkapazitätsengpässen von Bedeutung, da Holzwertverluste vor allem durch strategische Transportallokation entscheidend reduziert werden können. Dabei hat sich die Regel risikobehaftetes Holz vor Holz mit unverminderter Holzqualität vor abgewertetem Holz als zielführend erwiesen. Die Ergebnisse der umfangreichen Szenarien quantifizieren erstmals die Wichtigkeit der Einbeziehung zu erwartender Holzwertverluste in das Management der Holzlieferkette (statistisch signifikanter und in Regressionen modellierter Zusammenhang zwischen Beschaffungsdurchlaufzeit und Holzqualitätsverlust) und zeigen entsprechende strategische und taktische Transportoptionen zum proaktiven Risikomanagement auf.

4 Fazit

Aktuelle und zukünftige Herausforderungen verlangen nach innovativen, digitalen, quantitativen Entscheidungsunterstützungswerkzeugen für die traditionell konservativ eingestellten Akteure der Holzlieferkette. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten diskreten ereignisbasierten Simulationsmodelle belegen die hohe Eignung und intuitive Einsatzbarkeit dieser Methode für die kooperative Notfallplanung (konkrete Transportplanungstabellen), das proaktive Risikomanagement (klimakrisenbedingte Extremszenarien, Holzqualitätsentwicklung) und die Strategieentwicklung (*serious game-based simulation workshops*) in der Holztransportlogistik. Damit werden entscheidende Beiträge zur Nachhaltigkeit, zum Qualitätserhalt und – entsprechend der präsentierten Definition – zur Resilienz der Holzwertschöpfungskette geleistet.

Der wissenschaftliche Innovationsgehalt der drei präsentierten Modelle für die Holztransportsimulation umfasst unter anderem:

1. einen bisher einzigartigen Detaillierungsgrad in der Modellierung von multimodalen Holzlieferketten sowie die umfangreichste Kennzahlendarstellung in DES-Modellen für Holzlieferketten,
2. die erstmalige simultane Optimierung der Flottenkonfiguration sowie der Umschlaginfrastruktur für individuell parametrisierbare Ausgangssituationen und intuitive Aufbereitung der Ergebnisse in übersichtlichen Transportplanungstabellen und
3. erstmalige Quantifizierung der durch die Beschaffungsdurchlaufzeit bedingten Holzwertverluste und Vermeidung dieser durch die Entwicklung von Logistikstrategien zum proaktiven Riskmanagement.

Innovation umfasst neben der Entwicklung neuer Methoden, Techniken und Modelle auch deren Anwendung sowie Umsetzung von neuen Ideen und Wissen in die wirtschaftliche Praxis. Die Akteure der Holzwertschöpfungskette profitieren von den vorgestellten Erkenntnissen durch Wissenstransfer und -management im Rahmen von

etablierten (u.a. Vorträgen, Beratung, Veröffentlichungen in populärwissenschaftlichen Magazinen) und modernen Vermittlungsformen (*serious game-based simulation workshops* zur Strategieentwicklung, Planspiele mit vielfältigen Szenarien zum praxisnahen Einsatz der Transportplanungsstabellen).

Entscheidende Weiterentwicklungsmöglichkeiten für die Simulationsforschung beinhalten die Integration von Echtzeitdaten (Van der Valk et al. 2022) und künstlicher Intelligenz (Fowler und Rose 2022) in umfassend verifizierten und validierten Simulationsmodellen (Rabe et al. 2008). Die notwendige Entwicklung von digitalen Zwillingen und Nutzung der Fähigkeiten künstlicher Intelligenz zur Holztransportsimulation eröffnen daher großes Forschungspotential für weitere Beiträge zu nachhaltiger, resilienter und qualitätserhaltender Holzlogistik. Damit die technologischen Entwicklungen entlang von traditionellen Holzwertschöpfungsketten und deren konservativ agierender Akteure implementiert werden können, gilt es organisatorische Maßnahmen zu setzen, um die interne Systembereitschaft sicherzustellen. Hierfür ist es zielführend, die technologie-bedingt neuen Abläufe durch Veränderungsmanagement und Prozess-Reengineering zu begleiten, um den notwendigen Organisationskulturwandel (u.a. Innovationsbereitschaft durch datenbasierte Entscheidungsunterstützung) und strukturellen Vertrauensaufbau (u.a. Kooperationsbereitschaft zum transparenten Datenaustausch) breit in der Forst- und Holzbranche zu etablieren.

Literatur

- Acuna, M.; Sessions, J.; Zamora, R.; Boston, K.; Brown, M.; Ghaffariyan, M. R.: Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. *Current Forestry Reports* 5 (2019) 3, S. 124–141.
- Eriksson, A.; Eliasson, L.; Sikanen, L.; Hansson, P.-A.; Jirjis, R.: Evaluation of Delivery Strategies for Forest Fuels Applying a Model for Weather-Driven Analysis of Forest Fuel Systems (WAFFS). *Applied Energy* 188 (2017), S. 420–430.
- Federal Ministry for Agriculture, Forestry, Regions and Water Management (FMA): Green Report, 2022. <https://gruenerbericht.at/cm4/jdownload/send/2-gr-bericht-terreich/2398-gb2022>, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): The State of the World's Forests 2018 - Forest Pathways to Sustainable Development, 2018. <https://doi.org/10.18356/18a7cf8d-en>, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Forst-Holz-Papier (FHP): Leistungsbericht Wertschöpfungskette Holz, 2019. https://www.forstholzpapier.at/images/Leistungsbericht_kompakt_2019_Ansicht_FINAL.pdf, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Fowler, J. W.; Rose, O.: Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 11.–14. Dezember 2022.
- International Trade Center - joint agency of the World Trade Organization and the United Nations (ITC): Trade map, 2023. https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c

- [%7c44%7c%7c%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1](#), letzter Zugriff 01.07.2023.
- Kogler, C.: Decision Support by Discrete Event Simulation for the Wood Supply Chain. Dissertation at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (2020), S. 1–123. <https://permalink.obvsg.at/bok/AC16139733>.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Discrete Event Simulation of Multimodal and Unimodal Transportation in the Wood Supply Chain: a Literature Review. *Silva Fennica* 52 (2018) 4, S. 1–29.
- Kogler, C.; Rauch, P.: A Discrete Event Simulation Model to Test Multimodal Strategies for a Greener and more Resilient Wood Supply. *Canadian Journal of Forest Research* 49 (2019) 10, S. 1298–1310.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Game-based Workshops for the Wood Supply Chain facilitate Knowledge Transfer. *International Journal of Simulation Modelling* 19 (2020a) 3, S. 446–457.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Contingency Plans for the Wood Supply Chain based on Bottleneck and Queuing Time Analyses of a Discrete Event Simulation. *Forests* 11 (2020b) 4, S. 1–23.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Lead Time and Quality Driven Transport Strategies for Wood Supply Chains. *Research in Transportation Business & Management* 47 (2023), S. 1–13.
- Kogler, C.; Stenitzer, A.; Rauch, P.: Simulating Combined Self-loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests*, 11 (2020) 12, S. 1–15.
- Kogler, C.; Schimpfhuber, S.; Eichberger, C.; Rauch, P.: Benchmarking Procurement Cost Saving Strategies for Wood Supply Chains. *Forests* 12 (2021) 8, S. 1–18.
- Mobini, M.; Sowlati, T.; Sokhansanj, S.: A Simulation Model for the Design and Analysis of Wood Pellet Supply Chains. *Applied Energy* 111 (2013), S. 1239–1249.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new Procedure Model for Verification and Validation in Production and Logistics Simulation. In: Mason, S. J.; Hill, R. R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC)*, Miami, 7.–10. Dezember 2008.
- Van der Valk, H.; Winkelmann, S.; Ramge, F.; Hunker, J.; Langenbach, K.; Rabe, M.: Characteristics of Simulation: a Meta-review of Modern Simulation Applications. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC)*, Singapore, 11.–14. Dezember 2022.
- Väättäin, K.; Anttila, P.; Eliasson, L.; Enström, J.; Laitila, J.; Prinz, R.; Routa, J.: Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering* 42 (2021) 1, S. 39–61.
- Väättäin, K.; Laitila, J.; Anttila, P.; Kilpeläinen, A.; Asikainen, A.: The Influence of Gross VehicleWeight (GVW) and Transport Distance on Timber Trucking Performance Indicators – Discrete Event Simulation Case Study in Central Finland. *International Journal of Forest Engineering* 31 (2020), S. 156–170.
- Weintraub, A.; Epstein, R.; Morales, R.; Serón, J.; Traverso, P.: A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forest Industries. *Interfaces* 26(1996) 4, S. 1–12.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation-based Planning and Design of Hybrid AC/DC Energy Grids for Production Systems: A Holistic Approach

Simulationsgestützte Planung und Auslegung hybrider AC/DC-Energienetze für Produktionssysteme: Ein ganzheitlicher Ansatz

Martin Barth, Benjamin Gutwald, Eva Russwurm, Jörg Franke,
Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Germany
{martin.barth, benjamin.gutwald, eva.russwurm, joerg.franke}@faps.fau.de

Melanie Lavery, Raffael Schwanninger, Martin März,
Institute for Power Electronics (LEE)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Germany
{raffael.schwanninger, melanie.lavery, martin.maerz}@fau.de

Abstract: This paper proposes a simulation-based planning concept and a simulation architecture for the design of hybrid AC/DC grids, which have the potential to significantly contribute to the energy transition. The paper discusses the lack of knowledge in the market for the design of these grids, and presents a simulation approach to efficiently assemble hybrid networks and analyse them based on an electrical simulation. The authors also address the need to include process-specific characteristics in the planning and analysis of the electrical network, which is why common simulation tools for production processes are included in the approach. This allows economic, ecological, safety-relevant and technical aspects to be integrated into the planning process. The proposed concept is further discussed and planned for validation on the basis of a demonstrator currently under construction.

1 Introduction and Motivation

The use of alternating current to be used for general and widespread electrification was not set from the beginning. The war of currents was fought between the proponents of direct current (DC) and alternating current (AC) represented by Thomas Alva Edison and George Westinghouse respectively. The invention of the transformer in 1881 made it possible to transport electrical energy efficiently over long distances. This central aspect shapes our current electricity grid, which is based on alternating current.

Taking a closer look into production facilities quickly reveals that almost all electronic devices make use of direct current internally and are coupled to the AC mains via their own rectifier (Dragicevic et al., 2016). In addition, the energy transition with its DC-based generators and storage systems necessitate a reassessment. In this context, the system structures based on centralised rectification of AC mains voltage and bidirectional connection of all DC-based consumers and generators via this network branch has been established in various research projects and is already in the first industrial and domestic test networks. This approach leads to energy savings up to 10 %, easier integration of renewable energy and storage devices, and large material savings compared to AC-based decentralized distribution architecture. (Maerz et al., 2017; Savage et al., 2010; Sauer, A. 2020)

The largest previous project works in Germany are DC-Industry 1 and its follow-up project DC-Industry 2. They deal with the design of industrial DC grids (ZVEI, 2017, 2022). The Open Direct Current Alliance of the ZVEI was in turn founded to be the general follow-up research alliance for DC grids (Stern, 2023). Participating project partners are involved, for example, in the development of power electronic components, switching and protection components as well as the associated standardization in international standards and guidelines. Numerous other research projects like DC-Schutzorgane, DC-Smart or SiC4DC have resulted in a wide range of studies that investigate the protection concepts or the use of wide-bandgap semiconductors in power converters, the interaction of grid components and the potential for integration of regenerative energy use and storage or recuperative energy use (Fuchs, 2022; PTJ, 2022).

For this new grid structure, the first quasi-standards and new prototype products have emerged from the projects, but the general knowledge of economical, ecological and safe planning is still limited to a few experts who are involved in such research projects. For this reason, there are few people who are able to design such grids correctly so that the systems can be put into operation safely. (VDE DKE, 2018; Hirose et al., 2018; Stern, 2023)

This publication presents a concept on the cross-sector integration of research content, new prototypes and proposed standards. Furthermore, it outlines how these areas can be profitably integrated into a simulation environment to facilitate the safe and economic planning and construction of hybrid grid structures promoting distribution of scientific and economic knowledge.

The presented planning concept is based on a modelling approach to efficiently assemble hybrid networks within a simulation environment and to analyse them based on an electrical simulation for safety-related factors, network stability and load flow behaviour. On the other hand, connecting the electrical grid analysis to common simulation tools in the field of production planning are made possible. This will allow process-specific properties to be incorporated into the planning and analysis of the electrical network.

2 Goals and Purposes of DC Grid Design

Software-based solutions for electrical planning have a lot of potential with regard to aspects of system efficiency, economy, safety and system stability.

2.1 Economic planning

On the one hand, knowledge about the grid participants or prosumers must be available so that the electrical energy demand of the available grid connection and the technologies for generation plants and storage can be selected and dimensioned. A simulation of the power demand of the grid shows the utilisation of the planned energy converters, the coverage of energy by generators and, at best, helps with optimally dimensioning storage devices in terms of charging and discharging power as well as capacity (Schaab et al., 2018). Coupled with acquisition and operating costs, the simulation data can be used to carry out a profitability analysis, which is often indispensable for the investment decision in the new technology (Weckmann and Sauer, 2019).

This results in requirements for planning on an energy-related design and the return and understandable preparation of economic KPIs for the implementation of investment decisions.

2.2 Planning of the protection concept

Personal and object protection are essential requirements for electrical installations. In standardisation, the terms basic protection, fault protection and extended protection are concepts that must be considered in a protection concept. This includes protection against electric shock, overcurrent protection of equipment and transmission units as well as the mitigation of fire hazards, e.g. due to insulation faults (DIN VDE, 2018). Depending on the type of network and the associated earthing concept, different components are necessary to form a reliable protection concept (Gutwald et al., 2023). If, in addition, the aim is to achieve the highest possible system availability with selective protective devices, the design of DC networks with sensitive electronics, storage units and comparably high grid voltages and associated arcing risk is particularly complicated due to the lack of voltage and current zero crossings (VDE DKE, 2018; DIN VDE, 2014a, 2014b). For power distributions in the AC voltage range, the planning experience is available and software-based design has been established for a long time (e.g. Simaris Design, Curve Select, Hager CAD etc.). In the DC voltage range, software solutions and simulations to check the selection and combination of switching and protective devices are lacking.

For modelling, protection device tripping characteristics as well as essential data sheet parameters and electrical properties in the components are essential. If these are not provided by the manufacturer, empirical values should be available. Warnings must be issued if the planning does not comply with the rules.

2.3 Verification of the system stability

After all network participants, energy converters, the power system and the switching and protection devices have been suitably selected, there is still the risk of instability of the system. For this, detailed information about the current control of the power electronic components as well as the line lengths and resistances, capacitances and inductances are relevant. This detailed information is often unknown to planners and is frequently only provided in anonymised models. The mathematical calculations regarding the overall system resonances and stability criteria are so elaborate, complicated and error-prone that simulations validated in practice are the only practical solution.

The requirements for the simulations are, in particular, very detailed models of the power electronics with uniform interfaces, which can be integrated in a combined manner as far as possible with regard to know-how protection for manufacturers. The simulation must cover high dynamics in the time and frequency range.

3 Software Architecture for Simulation-based Planning of hybrid AC/DC Grids

According to the requirements of the previous chapter, a concept for a simulation-based software for planning hybrid AC/DC grids has been developed. The concept of the planning software is based on an intuitive and user-friendly operation that guides the user step by step through the use of the simulation and is oriented towards the use of common E-CAD tools. The resulting software architecture is shown in Figure 1.

This software should enable the user without the need for simulation skills to optimise these networks with regard to their load flow behaviour, to design components sensibly and safely and to carry out analyses with regard to network stability and fault cases.

The software architecture is based on three core concepts: a modular software structure, the chronological execution of a simulation study according to VDI 3633, and the domain coupling from the energetic level of the electrical network, as well as the process domain, which specifies the electrical load and allows production-dependent factors to flow into the analysis.

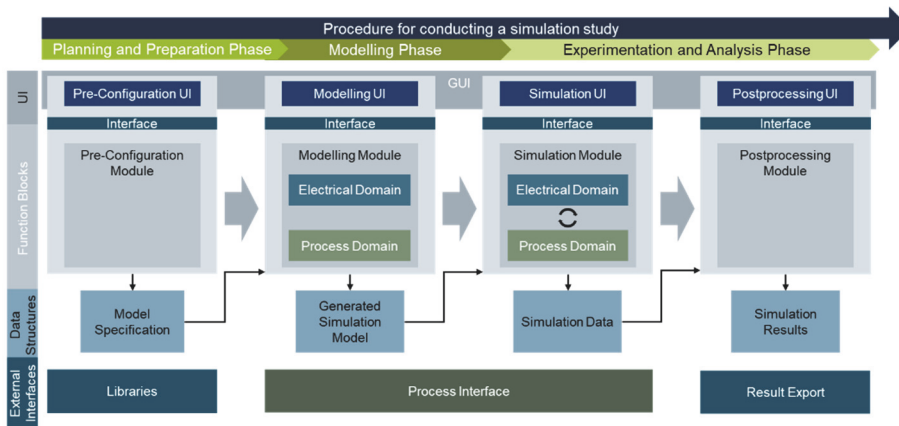


Figure 1: Software Architecture for Simulation-based Planning of hybrid Grids

The modularity of the software architecture is based vertically in the division into a graphical user interface (GUI), function-specific modules, and defined data structures for data exchange. Furthermore, external interfaces form the connection to various model libraries and simulation tools as well as to the data exchange of the simulation results.

The horizontal arrangement of the architecture describes and arranges the functionality of the different modules according to the temporal procedure of a simulation study according to VDI 3633.

The norm mentioned describes the procedure of a simulation study, beginning with a description of the objective and task definition. Based on this, the system analysis, model formalization and implementation follow for the model creation, as well as the aspects of data acquisition and processing in parallel. Finally, the created simulation model is used to generate added value through the execution of experiments and analysis (VDI, 2014).

Based on this, the proposed simulation tool supports the user in conducting the simulation studies of AC/DC grids in the sections of modelling, simulation, experiments and analysis without the need for an in-depth understanding of simulation and analysis methods.

The functional structure of the tool is therefore divided into the modules pre-configuration, modelling, simulation and post-processing which are described in more detail in the following chapters. The tool guides the user through these functions chronologically, picking up the results of the previous function block in each case.

The last core aspect is the coupling of the process domain of the factory with the domain of the energy grid. In order for realistic and production-related power curves of the individual network participants within the factory to flow into the network analysis, it is essential to connect and model the energetic behaviour of the factory's processes. In addition to analyses of the hybrid network, this will also allow energy optimisation to be derived in the future with regard to the use of stored recuperation energy and process-oriented energy management. The coupling strategy is described in more detail in chapter 4.

3.1 Pre-Configuration Module

The use of the simulation tool begins with the pre-configuration phase. Within this module, basic settings are made with regard to the libraries and interfaces used. In the technical sense, basic, unchangeable model properties are set. In the context of the electrical DC network, this includes the grounding model and the desired voltage range. These properties are stored within the model specification and can be reused in the following modelling module.

Furthermore, the desired forms of analysis can already be selected in this module, as these already have an influence on the creation of the simulation model. For the electrical network, the analysis of the load flow behaviour, the stability as well as the fault analysis are possible.

3.2 Modelling Module

With the help of the modelling module, the user is able to intuitively design the electrical network based on well-known E-CAD models. By using model libraries, no detailed modelling of the electrical components is required by the user, only parameterization. This allows the network to be put together in a plug-and-play manner. The processes at the production level, which as prosumers provide the electrical loads or sources of the network, can also be modelled in this module and linked to the network. A detailed description of the modelling of the electrical

components as well as the process participants and prosumers within the factory is given in Chapter 4. As a result, the modelling module generates an executable simulation model which is continued in the following simulation module.

3.3 Simulation Module

The Simulation Module is used to run the created simulation models and to define simulation experiments. Basic simulation settings, such as the simulation duration to be carried out and simulation time increments, can be set here. Furthermore, basic simulation parameters for the experiments such as the possible dimensioning parameters of an energy storage can be selected and parameterized here.

The module provides the raw simulation data as results, which can be analysed in more detail in the following Post-Processing module. The raw simulation data are primarily the generated current, voltage and power curves of the various network components over time. In the case of the desired stability analysis, the corresponding curves in the frequency range are also transferred.

3.4 Post-Processing Module

The last module analyses the generated raw simulation data in post-processing. The data is analysed, statistically processed and visualized here to provide the user with a simple, intuitive and provable statement about the simulation results. Depending on the different types of analysis, load flow analysis, fault analysis and stability analysis, appropriate visualization and evaluation forms are selected automatically.

The most important key figures for decision-making in relation to the design of the components, the security and the profitability of the network should be handed over to the planner through the preparation and the suitable visualization of the simulation results in KPIs.

4 Modelling and Simulation Concept

4.1 Electrical Simulation of the DC Grid

4.1.1 Pre-Configuration and Modelling Module: Input and Model Generation

The electrical grid of the production plant is modelled and simulated separately from the production process. General system characteristics such as grounding type and grid voltage schemes are set using the interface of the pre-configuration module as previously explained. The grid topology, components, grounding points, as well as electrical parameters and physical values are entered into the program using the graphic user interface of the modelling module. Since the computing time of the simulation increases with the size and complexity of the models, different analysis use cases are introduced. For each use case a grid model is generated which uses models with differing level of complexity for the same component. Therefore, simulations to study the power flow and energy management with no dynamics but long simulation times do not take nearly as long as when using the most complex models for system stability analysis

4.1.2 Simulation Levels and use-cases

The three analysis use cases are introduced to reduce the computing time. The use cases employ models of different complexity levels. The complexity level models utilized in the use case models are based on the respective component functionality group: power converters, passive components, and protection devices. The analysis use cases, and the level models are grouped as follows:

Use case 1 - Power flow and energy management evaluation: Level 1 component models for protection devices, passive components such as lines and filters, and power converters are used. If large energy storages are directly connected to the grid, or low dynamics are observed in power converters, their level 2 models need to be included into power/energy management simulations.

Use case 2 - Fault behaviour and selectivity evaluation: Level 3 models with non-linear and non-ideal behaviour are used for protection devices and passive components. The level of power converter models used depends on whether the control actively regulates faults. If the power converters impact on the fault behaviour is negligible simplified level 2 models can be used, if not level 3 models must be chosen.

Use case 3 - System stability and dynamic response evaluation: Power converters are modelled using non-linear complex level 3 models while passive components and protection devices are modelled using level 2 models as long there are no impactful operating point dependent change of impedance.

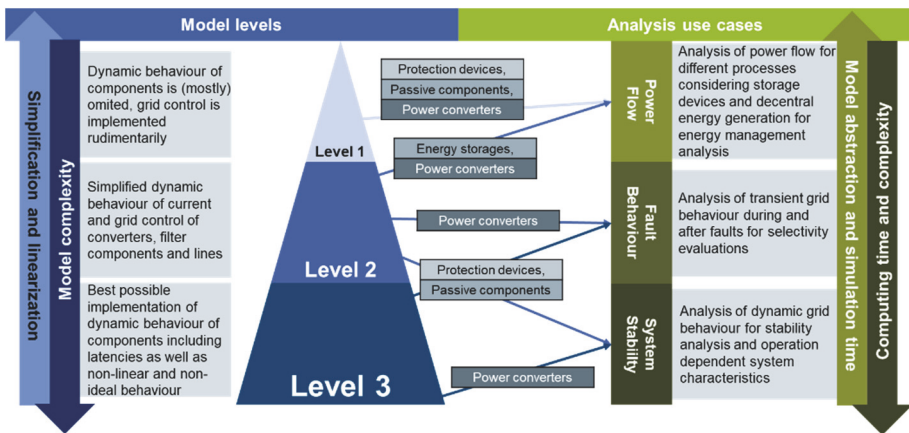


Figure 2: Level Concept for Modelling Grid Components

4.1.3 Simulation Module Output: Data Structure Simulation Output

In the simulation module the models are parametrized for the different analysis cases. Furthermore, complex simulations for fault behaviour and system stability analysis require data from the respectively less complex simulations. This data is used to set initial conditions for the simulation that define the operating point of the individual grid components. Therefore, the simulations for the use case models must be carried out in a certain order: From least to most complex. These parametrized models are then simulated: The raw output data includes the voltages and currents of all grid

nodes for the different parameter sets and use cases. This large amount of raw data is the basis of the evaluations carried out in the post-processing module mentioned in the previous chapter.

4.2 Coupling and Modelling of the Process Domain

The integration of the process domain of the production systems in the factory and thus the influence of production systems on the behaviour of the electrical network is possible through three different forms, each of which has a different level of complexity and detail. In each case the coupling concept between the process domain and the energy domain is identical and shown in Figure 3.

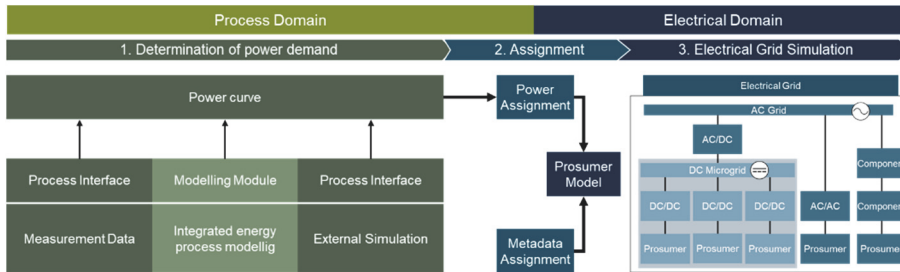


Figure 3: Coupling between the process and energy domains

In the first step, the power demand of the individual components is determined within the process domain. This power determination can be done in three ways: Connection of measurement data, linking of external simulations as co-simulation and an integrated energy process modelling within the tool. In the second step, the determined power curve is transferred to a prosumer model together with relevant meta-information about the corresponding component. This is part of the electrical network and now enables the simulation of the electrical domain. According to this procedure, a unidirectional coupling of the domains from the process simulation and the electrical network results.

4.2.1 Measurement Data

The simplest option is to connect measurement data via the Process Interface in the presented software architecture. Table-based time series of the performance curve can be assigned to the various prosumers in the electrical network. This means that the connection and analysis of existing production systems and their behaviour can be mapped in the tool without the need of complex simulation. Through this connection, the user is empowered to analyse the electrical DC grid through the load behaviour of existing plants in the brownfield.

4.2.2 Usage of External Process Simulation Tools

Furthermore, it is possible to connect external simulation tools such as Plant Simulation or other common tools in the use of virtual commissioning of machines and plants via the presented Process Interface. However, this requires the determination of the necessary performance. In this way, existing simulations in the greenfield can be used to analyse the influence of the electrical network in addition to

the analysis of the process behaviour. This variant has the greatest effort, as the process behaviour of the factory must first be modelled and, based on this, the electrical behaviour model for characterising the load flow must also be created. The advantage here is the profound possibilities of the analyses with regard to energetic process optimisation.

4.2.3 Integrated energy process modelling

Lastly, the third variant, which creates a compromise between the two previous methods in terms of detailing and effort, is the integrated modelling of the power curves of the process components. The load behaviour of the components can be modelled by the user within the modelling module. Common and proven methods that describe the energetic behaviour of the components at different levels of detail and levels within the factory are to find agreement here.

These include procedures and modelling methods similar to the EnergyBlocks method according to (Weinert et al., 2011), state-based procedures as in (He et al., 2012) and physical and analytical modelling procedures, to further model dynamic components like electric drives.

5 Discussion and Conclusion

This paper describes the advantages of DC grids in production environments and the resulting requirements for the design process of these grids. In order to simplify planning, the paper presents a basic concept for grid design and planning with consideration of connected process participants within a factory by using simulations. The user does not need to have in-depth knowledge of modelling, simulation, grid analysis or statistics. The simulation of the electrical network is based on a level-based approach to create a compromise between computing time and detail. Through the connection of external simulation tools, measurement data and the simple modelling of the power curves of the process participants, the electrical network can be planned, analysed and designed in every life cycle of an existing or planned factory. In future publications, the individual modules, the modelling concepts and the validation by means of a hardware demonstrator currently under construction will be dealt with in more detail.

Acknowledgement

This publication was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action through the project “DC|hyPASim” (Project no.: 50 LN/51 LN).

References

- DIN VDE: DIN VDE 0100-510:2014-10: Electrical installations of buildings - Part 5-51: Selection and erection of electrical equipment - Common rules (IEC 60364-5-51:2005, modified); German implementation HD 60364-5-51:2009 + A11:2013; Beuth 2014a.
- DIN VDE: DIN VDE 0100-718:2014-06: Low-voltage electrical installations - Part 7-718: Requirements for special installations or locations - Communal facilities

- and workplaces (IEC 60364-7-718:2011); German implementation HD 60364-7-718:201: Beuth 2014b.
- DIN VDE: DIN VDE 0100-410:2018-10: Low-voltage electrical installations - Part 4-41: Protection for safety - Protection against electric shock (IEC 60364-4-41:2005, modified + A1:2017, modified); German implementation of HD 60364-4-41:2017 + A11:2017: Beuth 2018.
- Dragicevic, T.; Lu, X.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M.: DC Microgrids—Part II. *IEEE Transactions on Power Electronics* (2016) 5, pp. 3528–3549.
- Fuchs, J., 2022: SiC4DC. Online verfügbar unter <https://www.faps.fau.eu/curforsch/sic4dc-edge-cloud-energy-management-for-dc-powered-automation-systems-with-sic-based-power-electronics/>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2022, zuletzt geprüft am 11.05.2022.
- Gutwald, B.; Ndjiemeni, F.N.; Barth, M.; Franke, J.: Simulation-Based Efficiency Comparison of Different Mains Configurations for DC Grid Branches for Supplying Production Plants Based on a Rule-Compliant Design. In: Kohl, H.; Seliger, G.; Dietrich, F. (Hrsg.): *Manufacturing Driving Circular Economy*. Cham: Springer International Publishing 2023, pp. 440–448.
- He, Y.; Liu, B.; Zhang, X.; Gao, H.; Liu, X.: A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system. *Journal of Cleaner Production* 23 (2012) 1, pp. 167–174.
- Hirose, K.; Tanaka, T.; Babasaki, T.; Person, S.; Foucault, O.; Sonnenberg, B.J.; Szpek, M.: *Grounding concept considerations and recommendations for 400VDC distribution system* 2018.
- Maerz, M.; Wunder, B.; Ott, L.: *LVDC-Netze – Herausforderungen und Perspektiven: ETG Conference* 2017.
- PTJ, 2022: Verbundvorhaben: DC-Schutzorgane. Online verfügbar unter <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=DC-Schutzorgane&v=10&s=3&id=602869>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2022, zuletzt geprüft am 11.05.2022.
- Sauer, A. (Hrsg.): *Die Gleichstromfabrik: Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend*. München: Hanser 2020.
- Savage et al.: *DC Microgrids: Benefits and Barriers* (2010).
- Schaab, D.A.; Weckmann, S.; Kuhlmann, T.; Sauer, A.: Simulative Analysis of a Flexible, Robust and Sustainable Energy Supply through Industrial Smart-DC-Grid with Distributed Grid Management. *Procedia CIRP* 69 (2018), pp. 366–370.
- Stern, S.M.: *ODCA Summary* (2023).
- VDE DKE: *Gleichstrom im Niederspannungsbereich: Deutsche Normungs-Roadmap* Version 2 August 2018.
- VDI: *VDI 3633 Blatt 1: Simulation of systems in materials handling, logistics and production - Fundamentals, Norm*, 2014,
- Weckmann, S.; Sauer, A.: DC Micro Grid for Energy Efficient and Flexible Production. *Procedia Manufacturing* 39 (2019), pp. 655–664.
- Weinert, N.; Chiotellis, S.; Seliger, G.: Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals* 60 (2011) 1, pp. 41–44.
- ZVEI: *Gleichspannungsnetze in der industriellen Produktion* 2017.
- ZVEI, 2022: DC-INDUSTRIE2 Vorstellung. Online verfügbar unter <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/dc-industrie2-projektvorstellung>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2022, zuletzt geprüft am 11.05.2022.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulative Analyse der nachhaltigen Transformation von Gussbetrieben

Simulative Analysis of the Sustainability Driven Transformation of Casting Plants

Johannes Dettelbacher, Wolfgang Schlüter, Alexander Buchele, HS Ansbach,
Ansbach (Germany), johannes.dettelbacher@hs-ansbach.de,
wolfgang.schluter@hs-ansbach.de, alexander.buchele@hs-ansbach.de

Abstract: The current energy crisis and the high cost of fossil fuels pose major challenges for energy-intensive industries such as the non-ferrous foundry industry. Therefore, it is important to promote the transition to renewable energy sources with the help of the electrification of the melting units. In this pilot study, for the first time the conversion of conventional foundries to sustainable technologies is simulated. For this purpose, a simulation model is developed based on a selected example company. It considers the energy consumption and the logistical effects of a converted operation. The simulation model is implemented as a hybrid simulation combining a discrete event simulation at the plant level and a process simulation within the furnaces. The study shows how a sustainable energy supply can be achieved in foundries. It also considers the impact of efficiency, energy costs and emissions.

1 Einleitung

Die aktuelle Energiekrise und die stark gestiegenen Kosten für fossile Brennstoffe stellen die energieintensiven Industrien in Deutschland vor große Herausforderungen. Um diesem Kostendruck zu begegnen ist es wichtig, den Umstieg zu erneuerbaren Energieträgern voranzutreiben. In der Nicht-Eisen(NE)-Gießereiindustrie beträgt der Anteil des fossilen Erdgases an den eingesetzten Energieträgern etwa die Hälfte, wobei dieses überwiegend für den Schmelz- und Warmhalteprozess des Metalls eingesetzt wird. Die Elektrifizierung der Schmelzaggregate bietet neben verfahrens- und werkstofftechnischen Vorteilen auch das Potenzial, ähnlich wie in der Elektromobilität, fossile Energieträger zu substituieren. Die Dekarbonisierung mit der Umstellung auf nachhaltige Technologien ist jedoch mit Herausforderungen verbunden. Insbesondere geht die Umstellung mit erheblichen Veränderungen der logistischen Betriebsabläufe einher und erfordert enorme Investitionen. Das

Werkzeug der mathematischen Modellierung kann hier eingesetzt werden, um die Machbarkeit und Potentiale dieser Transformation aufzuzeigen. Mit Hilfe von Simulationen können neue und nachhaltige Technologien sowie deren Integration in den Betriebsablauf vorab analysiert werden.

Im Rahmen dieser Pilotstudie wird erstmals der Technologiewandel hin zu nachhaltigen Gießereien simulativ untersucht. Anhand ausgewählter Gießereien wird, ausgehend von der bestehenden konventionellen Infrastruktur, die notwendige Veränderung der Prozessschritte hin zu einem nachhaltigen Betriebskonzept beschrieben. Daraus wird das Simulationsmodell mit dem zugehörigen Steuerungsmodul abgeleitet und in Matlab/Simulink implementiert. Anhand einer Simulationsstudie werden die Energieverbräuche sowie die Auswirkungen auf die betrieblichen Energiekosten in einem transformierten Betrieb betrachtet und die Machbarkeit einer nachhaltigen Energieversorgung aufgezeigt. Dabei spielt die Betrachtung der optimalen Betriebsauslegung eine wesentliche Rolle.

2 Transformation eines Aluminium-Gussbetriebs

Der Prozessablauf in einer konventionellen Gießerei kann in die folgenden Transport- und Prozessschritte unterteilt werden (siehe Abbildung 1):

- Beschickung der Schmelzaggregate über Stapler mit Masseln (Metallbarren), Rücklauf- oder Ausschussmaterial
- Schmelzprozess, welcher das Aufheizen, Schmelzen und Überhitzen bzw. Warmhalten des Metalls umfasst
- Transport des Flüssigmetalls mit zwischenzeitlicher Schmelzebehandlung (Impellern)
- Produktion von Gussteilen in den Druckgussanlagen (Gießprozess)

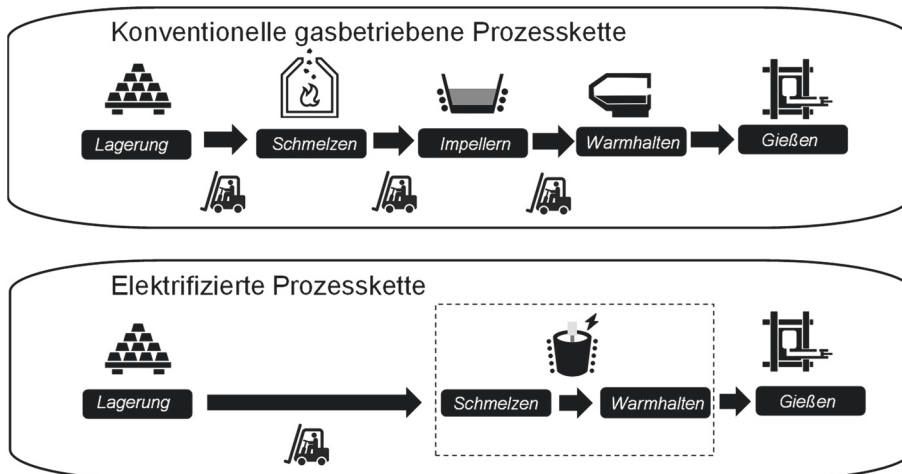


Abbildung 1: Vergleich der konventionellen und transformierten Prozesskette

Eine nachhaltige Transformation einer Gießerei sieht die Elektrifizierung der Schmelzaggregate sowie weitere Optimierungen hinsichtlich der Prozesskette vor (Herrmann 2013). Während in konventionellen Gießereien die vorher genannten Prozessschritte an verschiedenen Stellen im Betrieb stattfinden, zielt ein nachhaltigeres Konzept auf ein lokales induktives Schmelzen mit Schmelzprozess und Schmelzebehandlung an der Gießzelle ab. Dabei werden sowohl der Schmelzvorgang als auch die Schmelzebehandlung in einem Aggregat durchgeführt. Aufgrund der dezentralen Anordnung der Gießzellen ist jedoch eine deutlich höhere Anzahl von Schmelzaggregaten notwendig. Aufgrund verfahrenstechnischer Restriktionen sind für eine Gießzelle jeweils zwei Schmelzvorrichtungen erforderlich, die in einer Tandemanordnung abwechselnd zum Schmelzen bzw. Warmhalten des Materials eingesetzt werden und sich eine Stromversorgung teilen (Dötsch 2013). Als Ofentechnologie kann ein Induktions-Tiegelofen eingesetzt werden. Diese Umstellung führt zu erheblichen Veränderungen in der Logistik des Produktionsbetriebes. Während Transport- und Prozessschritte reduziert bzw. zusammengelegt werden, ergeben sich insbesondere bei der Bereitstellung und Beschickung des Metalls durch die erhöhte Anzahl an Schmelzaggregaten neue Herausforderungen an die Auslegung und Materialversorgung dieser Aggregate.

3 Stand der Technik

Die simulative Betrachtung von Gießereien ist Gegenstand verschiedener Arbeiten, welche sich in den Simulationsmethoden, den Systemgrenzen und dem Detaillierungsgrad unterscheiden.

In der Arbeit von Solding (2008) werden simulationsbasierte Methoden zur Analyse des Produktionssystems in Gießereien mit elektrischen Schmelzöfen eingesetzt. Es wird eine ereignisdiskrete Simulation verwendet, welche den Energiebedarf über die jeweiligen Maschinenzustände abschätzt. Eine Berücksichtigung der physikalischen Prozesse in den thermischen Anlagen findet hierbei nicht statt.

Fuss et al. (2013) untersucht die innerbetriebliche Produktion und die logistischen Materialflüsse einer Gießerei mit gasbetriebenen Schmelzöfen. Für die Modellierung der Energieflüsse werden zwei Modellierungsansätze gewählt. Neben dem zustandsabhängigen Energieverbrauch werden die thermischen Prozesse über Differenzgleichungen beschrieben. Für die Abbildung der komplexeren thermischen Anlagen wird ein hoher Abstraktionsgrad verwendet.

Die Arbeit von Peter et al. (2017) zeigt eine Methode zur Kopplung eines ereignisdiskreten Materialflusses mit einem kontinuierlichen Energiefluss. Die Methode wird anhand einer Gießerei mit den Prozessschritten Entnahme von flüssigem Aluminium aus dem Schmelzofen, Transport des flüssigen Metalls sowie Warmhalten des Aluminiums im Dosierofen demonstriert. Der Schmelzbetrieb wird in der Publikation nicht betrachtet.

Eine weitere Arbeit zeigt ebenfalls eine hybride Simulation und demonstriert die Methode an einem Anwendungsfall in einer Gießerei (Römer et al. 2018). Dabei wird der Prozess vom Warmhalteofen bis zur Fertigstellung des Bauteils abgebildet. Der Schmelzbetrieb wird hier nicht fokussiert.

Diese Pilotstudie baut auf Vorarbeiten auf, in denen ein konventioneller Gussbetrieb mit gasbetriebenen Schmelzöfen modelliert wurde (Schlüter et al. 2017). Dabei wird

der Produktionsprozess von der Lagerung des Rohmaterials über das Schmelzen im gasbefeuerten Schmelzofen bis hin zum Abguss der Bauteile abgebildet. Es wird ein hybrides Modell verwendet, das eine bidirektionale Kopplung zwischen Material- und Energiefluss ermöglicht. Das Simulationsmodell konnte anhand realer Betriebe validiert und im Rahmen einer simulationsbasierten Optimierung zur Verbesserung der Betriebsabläufe eingesetzt werden (Dettelbacher und Schlüter 2021). Die aufgeführte Literatur sowie eigene Vorarbeiten zeigen bereits die Berücksichtigung energetischer Aspekte bei der simulativen Untersuchung von Gießereien. Der Schmelzprozess steht jedoch nicht im Fokus der Betrachtung oder wird ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Stoff- und Energieflüssen nur ansatzweise abgebildet. Zur genaueren Bestimmung der Energieintensität des Schmelzbetriebes ist eine thermodynamische Betrachtung notwendig. Während die Betrachtung des Produktionsprozesses konventioneller Gießereien mit gasbefeuerten Schmelzöfen bereits in Vorarbeiten beschrieben wurde, fehlen noch Modelle für die Analyse eines transformierten Betriebes.

4 Simulationsmodell

Das im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte hybride Simulationsmodell umfasst die Material- und Energieflüsse im Produktionsprozess eines nachhaltigen Gussbetriebes, wie er im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde. Eine Herausforderung bei der Modellierung eines Schmelz- und Gussbetriebes besteht darin, dass der Betrieb sowohl ereignisdiskrete und kontinuierliche Prozesse aufweist. Während der Materialfluss sowohl diskrete (z. B. Staplertransport) als auch kontinuierliche (z. B. Schmelzprozess) Komponenten enthält, wird der Energiefluss rein kontinuierlich modelliert. Auf Fabrikebene wird der Materialfluss ereignisdiskret simuliert, während die Schmelzöfen durch einen endlichen Automaten für die Maschinenzustände und eine kontinuierliche Prozesssimulation für den internen Material- und Energiefluss abgebildet werden. Der Schmelzprozess ist komplex und benötigt die stetige Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Material- und Energiefluss. Die Abbildung des kontinuierlichen Materialflusses beim Schmelzvorgang erfolgt mit Hilfe von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Diese sind bidirektional mit den Differentialgleichungen des Energieflusses gekoppelt, um die Wechselwirkung zwischen Energie und Masse beim Schmelzvorgang zu berücksichtigen. Der Modellierungsprozess sowie die schematische Implementierung sind in Abbildung 2 dargestellt. Für die hybride Simulation besteht eine Kopplung der Simulationsteilmodelle, wobei der Informationsaustausch in jedem Simulationsschritt erfolgt. Die ereignisdiskrete Simulation auf Fabrikebene umfasst das Materiallager, die Stapler, die Transportwege von der Beschickung der Schmelzöfen bis zur Produktion der Bauteile in der Gießmaschine. Der Materialfluss beginnt im Materiallager, das bei Materialanforderung eine Entität für das Ausgangsmaterial bereitstellt. Die Attributierung der Entität mit der Materialkonfiguration und die Zuordnung zu einem bestimmten Schmelzaggregat erfolgt über eine aufgerufene Funktion. Der Transport der Entität setzt die Verfügbarkeit eines Gabelstaplers voraus. Der Transport erfolgt bis zur Beschickung, wobei die Entität durch ein Prozesssignal an den Schmelzofen eine Erhöhung des Füllstandwertes generiert. Auf der Ebene der Schmelzaggregate wird ein GreyBox-Modell mit einem physikalischen Grundmodell verwendet, das auf den Erhaltungssätzen für Masse und Energie basiert. Eine schematische Darstellung des Ofenmodells zeigt Abbildung 3. Das

Energieflussmodell umfasst den Energieeintrag durch die Induktoren, das thermodynamische Verhalten des Metalls beim Aufheizen, Schmelzen und Überhitzen sowie die Wärmeabgabe an die Umgebung. Der Schmelzvorgang wird über eine Differentialgleichung abgebildet und berücksichtigt hierbei die aufzubringende Schmelzenthalpie. Die Parametrisierung des Grey-Box-Modells erfolgt unterstützend mit Hilfe von CFD-Simulationen. Das Materialflussmodell im Aggregat enthält die Materialbeschickung, den Schmelzvorgang sowie die Materialentnahme.

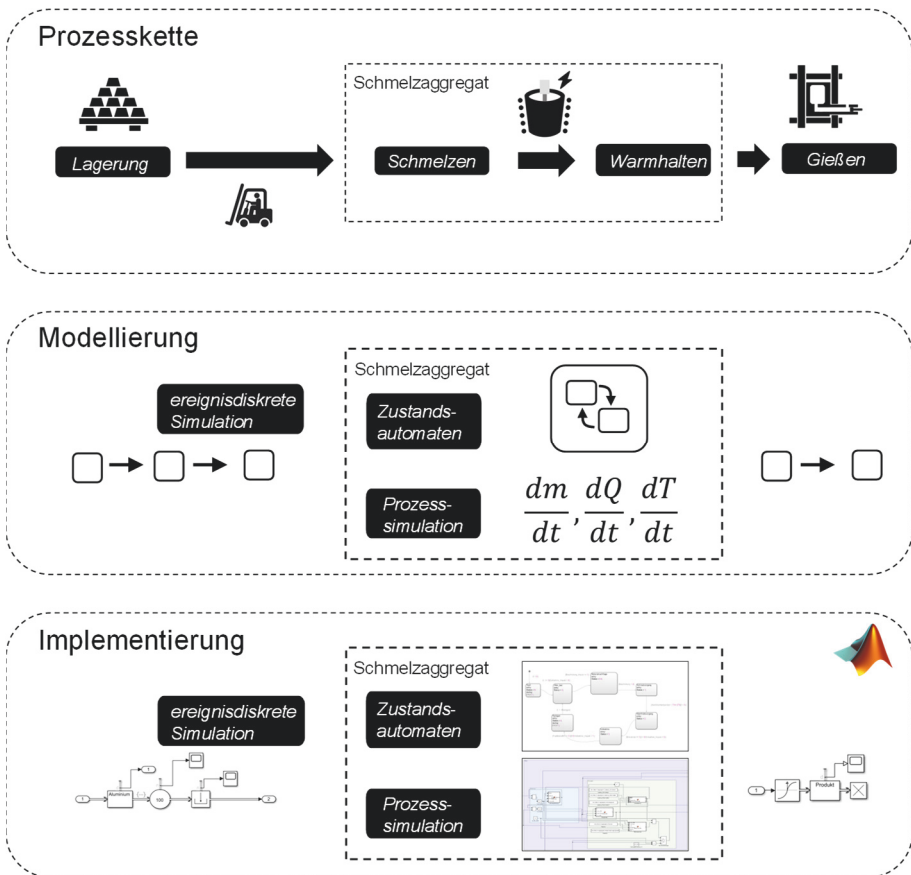


Abbildung 2: Schritte zur Implementierung des Simulationsmodells

Das Schmelzaggregatmodell dient als Submodell für eine Gießeinheit, die eine Gussmaschine mit zwei Schmelzaggregaten in Tandemanordnung zusammenfasst. Die Gießeinheit ist mit einer Steuerung verbunden, die auf Basis der Ofenprozesswerte wie Temperatur und Materialfüllstand den Prozess der Tandemanlage steuert. Dazu gehört neben der Heizregelung und der Materialentnahme durch den Gießprozess auch die Festlegung des Betriebszustandes der Schmelzaggregate: Während sich ein Aggregat im Schmelzprozess befindet, dient das andere Aggregat zum Warmhalten der Schmelze bei der zeitgleichen Entnahme

für den Gussprozess. Ein Aggregat durchläuft folgende Zustände: Ruhezustand, Materialanforderung, Schmelzvorgang, Schmelzebehandlung, Materialentnahme und Reinigungsvorgang. Während der Materialentnahme wird aus der Prozesssimulation ein Ereignissignal für die Produktion generiert. Anschließend wird in der ereignisdiskreten Simulation eine Entität für das entsprechende Produkt erzeugt.

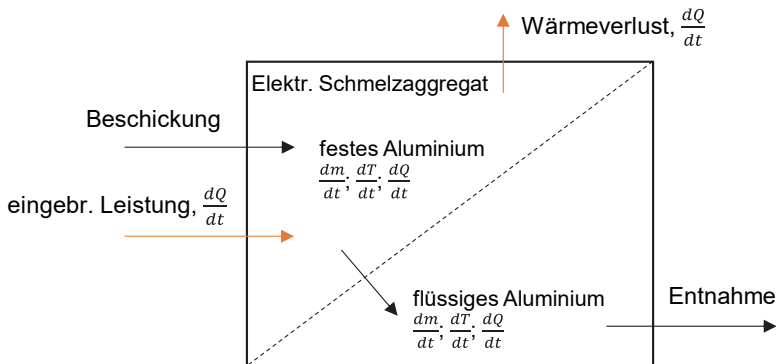


Abbildung 3: Modellierung des elektrischen Schmelzaggregates

Die Submodelle der Gießeinheiten sind die Hauptkomponenten des Gesamtmodells. Das Simulationsmodell ist auf Fabrikebene mit einer Betriebssteuerung verbunden, die die Anlieferung und den Abtransport von festem Aluminium durch Gabelstapler steuert. Dieses Steuerungsmodul ermöglicht die Untersuchung verschiedener Betriebsstrategien sowie die Optimierung des Betriebsablaufs. Das Simulationsframework wurde für einen frei konfigurierbaren Betrieb entwickelt. Die Festlegung der Betriebsstruktur erfolgt vor dem Simulationslauf über eine Konfigurationsdatei, in der neben den jeweiligen Anlagenparametern und Materialdaten auch der Produktionsplan sowie Produktdaten festgelegt werden. Die Simulation wird in der Umgebung Matlab/Simulink von MathWorks durchgeführt. Für die ereignisdiskrete Simulation und für die Abbildung der Maschinenzustände werden die Matlabprodukte SimEvents sowie Stateflow verwendet.

5 Simulationsstudie

Im Rahmen einer Simulationsstudie werden die Machbarkeit des nachhaltigen Transformationsprozesses sowie Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt. Als Referenz dient der modellierte konventionelle Gießbetrieb mit gasbefeuelten Schmelzöfen, welcher anhand der Daten zweier realer Betriebe validiert wurde (Schlüter 2017). In der Simulationsstudie wird einer dieser Gießbetriebe mit 24 Gießmaschinen betrachtet, welcher jährlich etwa 10.000 t Aluminium verarbeitet. Durch die dezentrale Tandemanordnung der Schmelzaggregate werden für den transformierten Betrieb 48 Aggregate benötigt. Im Rahmen der Simulationsstudie wird der Produktionsplan einer realen Betriebswoche verwendet.

In einem ersten Schritt wird die Machbarkeit der Transformation nachgewiesen. Anhand unterschiedlicher Parametrisierungen der Schmelzaggregate hinsichtlich

Kapazität und elektrischer Leistung werden die Auswirkungen insbesondere auf den Betriebsablauf analysiert und bewertet. Als Ofenkonfiguration werden drei Ofentypen vorgegeben und die Anzahl der jeweiligen Öfen variiert. Die Ofentypen S, M und L sind in Tabelle 1 beschrieben. Eine Tandemanlage besteht immer aus zwei Öfen eines Typs.

Tabelle 1: Betrachtete Ofentypen

Ofentyp	Fassungsvermögen [kg]	Elektr. Leistung [kW]
S	250	125
M	350	250
L	500	350

Es ergibt sich ein Optimierungsproblem zur Auslegung der Ofenkonfiguration. Als Bewertungskriterien werden die Produktionsmenge P, der Energieverbrauch EV sowie eine Betriebskennzahl für die Produktionsunsicherheit PS verwendet, die als Ausgabewerte aus der Simulation generiert werden. Die Produktionsunsicherheit beschreibt die Vulnerabilität der Produktion bei Betriebsstörungen bzw. Maschinenausfällen. Die Kennzahl wird bestimmt, indem die Restlaufzeit der Gießmaschinen zu jedem Zeitpunkt mit einem Schwellenwert verglichen und die entsprechenden Zeitpunkte aufsummiert werden.

Für die Analyse kann neben metaheuristischen Optimierungsmethoden auch der Brute-Force-Ansatz verwendet werden, da die Anzahl der Möglichkeiten in einer annehmbaren Rechenzeit simuliert werden können. Beim Brute-Force-Algorithmus werden alle möglichen Konfigurationen simuliert, was die Visualisierung der Ergebnisse aller Konfigurationsmöglichkeiten sowie eine Interpretation dieser ermöglicht. Eine Visualisierung der Teilziele Produktionsmenge P, Energieverbrauch EV sowie Produktionsunsicherheit PS ist in Abbildung 4 dargestellt. Jeder Gitterpunkt steht für eine Simulation der vorgegebenen Betriebswoche bei unterschiedlichen Anzahlen der Ofentypen in der Tandemanordnung. Die Anzahl der Tandemanlagen vom Typ S ergibt sich aus der Differenz der Gesamtanzahl (24) und der Anlagen der Typen M und L. Am Koordinatenpunkt (0,0) werden nur Anlagen vom Typ S, am Koordinatenpunkt (24,0) nur Anlagen vom Typ M und am Koordinatenpunkt (0,24) nur Anlagen vom Typ L verwendet.

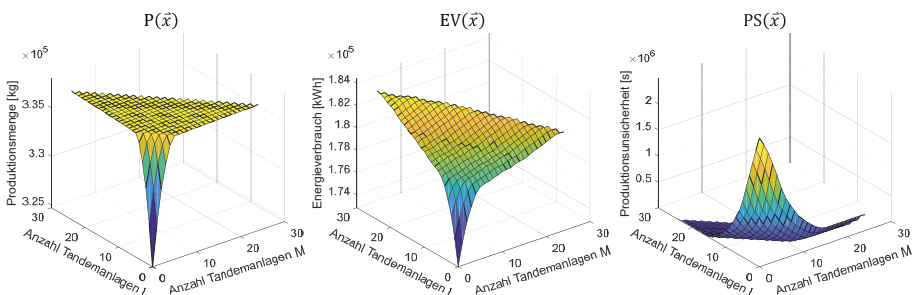


Abbildung 4: Konfigurationsabhängigkeit der Bewertungskriterien

Es zeigt sich, dass unterschiedliche Konfigurationen die Teilziele in unterschiedlichem Umfang erfüllen. Bei der Auslegung mit ausschließlich Tandemanlagen S resultiert ein reduzierter Energieverbrauch, während die durchlaufende Produktion nicht gewährleistet und die Produktionsunsicherheit stark erhöht ist. Mit zunehmenden Tandemanlagen L steigt der Energieverbrauch im Betrieb an. Bei der reinen Auslegung mit Tandemanlagen M zeigen sich bereits Betriebszeitpunkte mit erhöhter Produktionsunsicherheit.

Um eine gesamtheitliche Bewertung zu erreichen, werden die Teilziele in einer Zielfunktion f zusammengefasst (siehe Formel 1). Dazu werden die Teilziele auf die gemeinsame Einheit € umgerechnet, indem diese mit spezifischen Gewichtungsfaktoren multipliziert werden. In den spezifischen Gewichtungsfaktoren wird zudem eine Normalisierung durchgeführt. Der Aufbau der Zielfunktion ermöglicht die Berücksichtigung individueller Optimierungsabsichten für den einzelnen Betrieb. Der Ansatz ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung in einer Zielfunktion, jedoch müssen die Gewichtungsfaktoren zusammen mit Prozessexperten bestimmt werden und lassen sich betriebspezifisch anpassen. Insbesondere das Abschätzen der Gewichtung der Ausfallrisikokosten erfordert detailliertes Betriebs- und Prozesswissen und ist von den jeweiligen Produktionsumständen abhängig.

$$f(\vec{x}) = w_1 * P(\vec{x}) - w_2 * EV(\vec{x}) - w_3 * PS(\vec{x}) \quad (1)$$

\vec{x} :	<i>Ofenkonfiguration</i>
w_1	<i>spez. gewichteter Erlös [€/kg]</i>
w_2	<i>spez. gewichtete Energiekosten [€/kWh]</i>
w_3	<i>spez. gewichtete Ausfallrisikokosten [€/s]</i>
$P(\vec{x})$:	<i>Produzierte Masse des Betriebes [kg]</i>
$EV(\vec{x})$:	<i>Energieverbrauch des Betriebes [kWh]</i>
$PS(\vec{x})$:	<i>Ausfallrisikozeit [s]</i>

Im Folgenden werden die Gewichtungsfaktoren so angenommen, dass die Produktion als primäres Hauptziel dient. Mit den angenommenen Gewichtungsfaktoren ($w_1 = 1$ €/kg, $w_2 = 0,01$ €/kWh, $w_3 = 0,05$ €/s) ergibt sich als optimale Anlagenkonfiguration: Tandemanlagen $S = 0$, $M = 19$ und $L = 5$.

In einem zweiten Schritt wird ein transformierter Betrieb dieser Konfiguration mit einem konventionellen Betrieb verglichen. Als Bewertungsgrundlage dienen die Produktivität sowie der Energieeinsatz. Aus dem Energieeinsatz lassen sich die jeweiligen Energiekosten sowie die CO₂-Emissionen ermitteln (siehe Abbildung 5). Die Angaben sind jeweils auf die Ergebnisse des konventionellen Betriebes normiert.

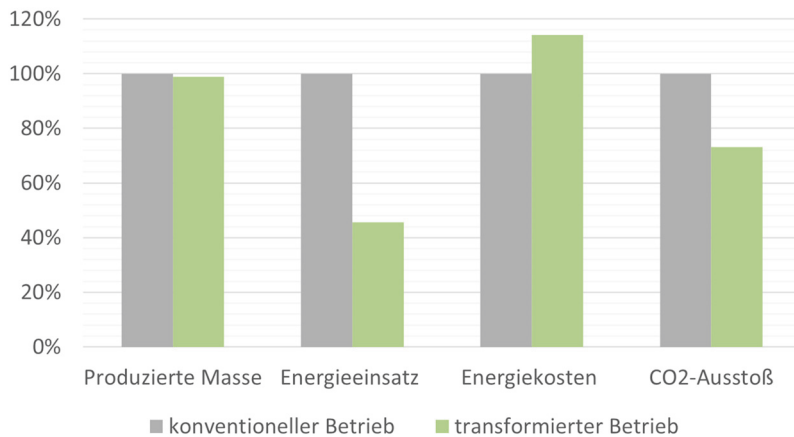


Abbildung 5: Vergleich des konventionellen mit dem transformierten Betrieb

Es zeigt sich, dass die Produktivität auch im transformierten Prozess gewährleistet ist. Der Energieeinsatz wird reduziert, wobei im konventionellen Betrieb Primärenergie (Erdgas) und im transformierten Betrieb Sekundärenergie (elektrische Energie) eingesetzt wird. Die Umrechnung in Energiekosten zeigt, dass bei aktuellen Energiepreisen (Strom: 100 €/MWh, Erdgas: 40 €/MWh) keine Einsparungen erzielt werden. Bei den CO₂-Emissionen ist festzustellen, dass mit dem aktuellen Strommix (Strom: 400 kg_{CO2}/MWh; Erdgas: 250 kg_{CO2}/MWh) bereits eine Reduktion der Emissionen im Vergleich zum konventionellen Betrieb erreicht wird. In Zukunft werden sich die Energiekosten des konventionellen Betriebes mit der massiven Steigerung der CO₂-Zertifikatspreise weiter erhöhen. Zeitgleich werden sich die CO₂-Emissionen des transformierten Betriebes mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien weiter reduzieren. Perspektivisch werden sich für den transformierten Betrieb dadurch deutliche Vorteile im Bereich der Energiekosten sowie CO₂-Emissionen ergeben. Bei einer umfangreicheren Kostenbewertung sind noch zusätzliche Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Betriebskosten der Rauchgasreinigung im konventionellen Betrieb und die Abschreibungen der Investitionskosten bei beiden Betriebsformen, zu berücksichtigen. Hierbei fallen für den transformierten Betrieb hohe Investitionskosten für die Induktionsöfen an.

6 Fazit und Ausblick

Der Beitrag zeigt, wie die Kopplung verschiedener Simulationsparadigmen zur Abbildung eines kompletten Schmelz- und Gießprozesses genutzt werden kann. Die Methode kann eingesetzt werden, um die ereignisdiskreten Prozesse im Produktionsablauf zusammen mit den kontinuierlichen Schmelzprozess abzubilden und zu analysieren. Im Rahmen der Simulationsstudie konnten Ergebnisse hinsichtlich der Machbarkeit und Effizienz einer Transformation eines Gussbetriebes durch Elektrifizierung der Schmelzaggregate gezeigt werden. Es wird die produktionstechnische Umsetzbarkeit aufgezeigt, die erhebliche intralogistische Änderungen erfordert. Unter den aktuellen ökonomischen und technologischen

Rahmenbedingungen führt das zu Emissionseinsparungen, weist jedoch im Vergleich zu konventionellen Produktionsverfahren noch erhöhte Energiekosten auf.

Im nächsten Schritt ist geplant, den Detaillierungsgrad des Simulationsmodells weiter zu erhöhen. Mit Hilfe einer Laboranlage sollen die Einflüsse und Prozesse besser charakterisiert und die Simulationsergebnisse mit realen Daten verifiziert werden.

Während die Machbarkeit und die Einsparpotentiale mit dem Simulationsframework aufgezeigt werden können, ist es zudem notwendig, den transformierten Betrieb auch im operativen Bereich zu optimieren. Im Rahmen eines laufenden Pilotprojektes sollen verschiedene Szenarien mit Variation der Produkte sowie der Maschinenverfügbarkeiten durchgespielt werden, um auch diese Einflussfaktoren zu analysieren. Insbesondere sollen unterschiedliche intralogistische Betriebssteuerungen betrachtet werden.

Literatur

- Dettelbacher, J.; Schlüter, W.: Material- und Energieflusssimulation zur prädiktiven Bestimmung von Ofenreinigungsintervallen. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 85-92.
- Dötsch, E.: *Induktives Schmelzen und Warmhalten*. 3. Aufl. Essen: Vulkan Verlag 2018.
- Fuss, E.; Drvendzija, S.; Krewald, A.: Transparenz als Schlüssel zur energieeffizienten Produktion: Ablaufplanung in Schmelzerei und Gießerei mittels planungsbegleitender Energie- und Materialflusssimulation. *Productivity management* 18 (2013) 3, S. 35–38.
- Herrmann, C.; Pries, H.; Hartmann, G.: *Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss*. Berlin, Heidelberg: Springer 2013.
- Peter, T.; Wenzel, S.; Reiche, L.; Fehlbier, M.: Coupled simulation of energy and material flow — A use case in an aluminum foundry. In: Chan, V; D’Ambrogio, A.; Zacharewicz, G.; Mustafee, N. (Hrsg.): *Winter Simulation Conference*. Las Vegas (USA): IEEE 2017, S. 3792-3803.
- Roemer, A. C.; Rückbrod, M.; Straßburger, S.: Eignung kombinierter Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte in der Produktionssimulation. In: 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg: ARGESIM 2018, S. 73-80.
- Schlüter, W; Henninger, M.; Buswell A.; Schmidt, J.: Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, Kassel, 2017, S. 19–28.
- Solding, P.: *Increased Energy Efficiency in Manufacturing Systems Using Discrete Event Simulation - Applied Studies on the Swedish Foundry Industry*. Dissertation De Montfort University Leicester, Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften, 2008.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation Platform for Energetic Considerations in Matrix Production Systems

Plattform zur Simulation von energetischen Einflussfaktoren in Matrix-Produktionssystemen

Marc Münnich, Fraunhofer IWU, Chemnitz (Germany),
marc.muennich@iwu.fraunhofer.de

Steffen Ihlenfeldt, Technische Universität Dresden, Dresden (Germany),
steffen.ihlenfeldt@tu-dresden.de

Sebastian Thiede, University of Twente, Enschede (The Netherlands),
s.thiede@utwente.nl

Abstract: Matrix production systems are designed to be flexible and productive at the same time. This is to be achieved by a modular design and high degree of automation in terms of process control, material transport and work distribution. This also affects the flow of energy which results in a highly variable energetic behaviour of the overall system. This contribution presents a synthetic simulation platform approach to investigate the energetic behaviour of matrix production systems. The setup and modules of the approach are pointed out based on the typical characteristics of matrix production systems. An experiment study is showcased to demonstrate the approach and give an insight into the results of the simulation.

1 Introduction

Matrix production systems (MPS) are perceived as a system variant that can cope with various internal and external change drivers and stay competitive within a turbulent market environment. These systems are designed to be scalable and flexible and still allow it to produce high output volumes (Greschke et al., 2014).

Especially assembly systems for customized serial production can benefit from this kind of systems in terms of scalability, flexibility and modularity. Currently, rigidly connected systems are the dominant design variant that allow high efficiency as long as the product spectrum remains stable in volume and variants (Foith-Förster and Bauernhansl, 2016). Here, product variability complicates the dispatching of jobs in pearl chain systems, and thus also the vulnerability of the overall supply chain. These challenges are to be tackled with MPS by dissolving the rigid flow and design a

flexible and demand-oriented system with process modules that are designed to be variable in skills and location (Bauernhansl et al., 2020).

MPS show a strong penetration of cyber-physical system elements that enable entities on all system levels to connect to each other, to communicate and engage elevated control approaches. A drawback of these concepts is of course the higher effort in domination of complexity or development of suitable operational concepts (Müller et al., 2020). Especially for the assessment of system solutions simulation is a suitable tool. Various authors conducted studies based on simulation so far, e.g.:

- for the comparison of conventional assembly systems with matrix-structured ones (Greschke, 2015)
- for the validation of designs for matrix-structured assembly systems (Foith-Förster, 2022)
- for planning and control of modular assembly systems (Kern, 2021)
- for assessing the operational and routing flexibility (Perwitz et al., 2022).

Despite the current focus on assembly systems, the concept of MPS itself is meant to be adaptable by other production or manufacturing paradigms as well (Greschke et al., 2014). Distinct simulation-based approaches that investigate the general system behaviour have been, among others, showcased by:

- Filz et al. to analyse different material supply strategies (Filz et al., 2019)
- Schönemann et al. to investigate different system configurations (Schönemann et al., 2015).

So far, only Schönemann et al. (2015) gave an outlook on possible energetic considerations in MPS. Kurlle et al. conducted a study on energy- and time-efficient production planning and control strategies in manufacturing systems with “[...] a dynamic system behaviour and decentralized decision making logic of individual elements such as jobs and its products” (Kurlle et al., 2016, p. 442) with a pictorial presentation of a matrix-structured manufacturing system but did not mention MPS in particular. Hence, similar system might have been investigated so far, but MPS have not been mentioned explicitly. However, Thiede (2022) emphasizes the role of cyber-physical production systems (CPPS) for further decarbonization in manufacturing industry. Especially energy efficiency and energy flexibility are potential levers for environmental improvements by Industry 4.0 technologies, e.g., energy aware process design or dimensioning of energetic infrastructure (Thiede, 2021). MPS can provide support here as well, but the potential remains unclear.

One main aspect to successfully operate CPPS such as MPS is to integrate analytical and simulation-based approaches (Monostori et al., 2016). Simulation of energetic considerations has been investigated extensively. Exemplarily, Kouki et al. (2017) provide a review of different approaches for input data management in DES that includes the considered energy, input data acquisition, modelling boundaries and fields of application. Roemer and Strassburger (2016) conducted another review and identify various approaches that deal with the integration of energy data in simulation as well as the simulation-based optimization of energy efficiency. This underpins the relevance of simulation in this context, even though further sources might be mentioned here. Hence, this paper aims to start filling this gap with the explicit consideration of energetic aspects in simulation of MPS. Especially the flow electrical energy is of uncertainty due to reactive behaviour of material flow and production processes. Technologies such as automated guided vehicles (AGV), load strategies

and the flexible allocation of material to production processes with dynamic change of operational states are examples of these influences. The approach for the simulation study in Figure 1 incorporates the procedure model of VDI 3633 (VDI 3633 - 1).

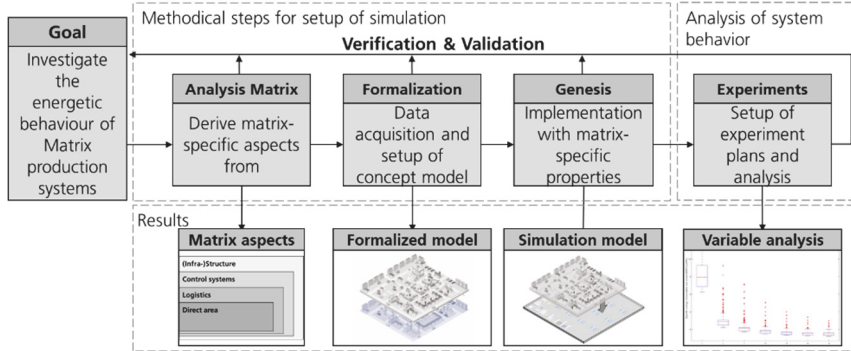


Figure 1: Approach to investigate energetic considerations in MPS with simulation

This includes the analysis of current MPS-related literature to derive matrix-specific design fields and aspects. Based on an industrial context, relevant data for the simulation is acquired and together with the matrix-specific aspects implemented in a simulation model. The goal is to ensure a wide variability of parameters and variables in the model to conduct a wide range of experiments.

2 Characteristics and simulation of MPS

MPS are meant to unite three aspects: flexibility, changeability and reconfigurability. From a system perspective, they are highly flexible and able to balance temporary alterations of workload and product mix very well. This is due to the modular design that enables a flexible material flow (Greschke et al., 2014).

A characteristic feature from a system perspective, especially in existing pictorial presentations of MPS, are the process modules being structured in rows and lines. The work contents are not segmented and usually clustered in multipurpose machines. The material flow is not interlinked to decouple cycle times and reduce productivity losses (Echsler Minguillon, 2020) and is not directed so that every product can have its individual path through the processing stations. Fries et al. (2020) illustrate this principle along with other characteristics of material flow.

So far, many approaches investigated MPS in the context of assembly systems. The main goal here is to keep the efficiency of a rigidly linked system but to increase the product variability in the overall system. The core idea of MPS in assembly is to divide the overall system in smaller sub-systems and decouple cycle times from subsequent stations. This avoids the sub-systems to all have the same cycle time. Instead, the average cycle time of all sub-systems has to meet the average process time from all processes (Greschke et al., 2014). This requires it to assign at least two work contents to every work stations and to realize redundancy, hence, flexibility in the overall system (Greschke, 2015). Job shops on the other side usually incorporate the principle of decoupled processes with a higher degree of flexibility in work content assignment

to process modules but lack an automated and flexible material flow to optimize the utilization of stations and reduce blocking and starving of processes. In both cases, intelligent system structures enable the transition to MPS. Cyber-physical elements, real-time location systems, information and communication technologies (ICT), autonomous production and transport resources enable for decentralized decision making, surveillance and system control. The allocation of these aspects towards control systems, production and building infrastructure, logistics, personnel and production processes enable MPS to reach a high utilization by varying product portfolio and to quickly adapt to changes of market demands. Reconfiguration processes give the opportunity to redistribute work contents and react to altered production programmes (Greschke et al., 2014).

But these principles do also lead to more unforeseeable effects in process control and logistics. Dynamic and stochastic effects are increasing and need to be investigated properly when designing these kind of systems, e.g., presented by Filz et al. (2020) for the logistics system in early planning phases. Due to the less foreseeable critical factors in system design, the reconfiguration management needs to be considered during operation of the system (Müller et al., 2020). Overall, a wide range of design aspects as well as their interconnections must be examined when investigating the general behaviour MPS. A classification taking up the extended system model approach from Eversheim (Bauernhansl, 2020) shows the main design aspects of production design in general, that can also be applied in MPS. These are clustered to similar groups of design fields in Figure 2.

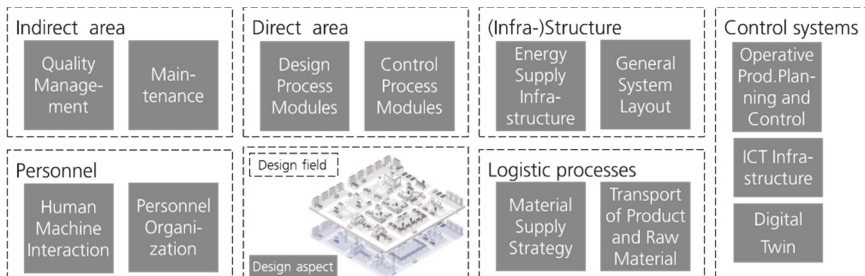


Figure 2: Main aspects of MPS design

The main point to consider when simulating MPS were subsumed by Schönemann et al. (2015). They elaborated the general principles of flexible routing of material and products, redundancy in work contents within the system, process modules with various skills for processing and individual cycle times for products per process module. To transfer these properties into a simulation model, the elements products, workstations, material flow and buffers need to be considered accordingly. Their analysis results of the simulation study consider utilization of work packages, the blockage of system elements as well as a dynamic visualization of the process stations (Schönemann et al., 2015). Filz et al. (2019) investigated the material supply of matrix systems by means of simulation and conducted experiments with different material supply, routing strategies and configuration of the respective AGV. So far, the material flow and system design have been analyzed by various other authors as well (Greschke, 2015; Kern, 2021; Schukat et al., 2022), but there are shortcomings in the

energetic perspective of MPS, whereas only specific parameters such as embodied energy per product have been mentioned as future topics of interest (Schönemann et al., 2015).

3 Setup of simulation platform

The gap in energetic considerations of MPS is addressed by the introduction of a simulation platform. The goal is to design a platform that employs the main characteristics of a MPS and allows to vary a wide range of parameters for experimental exploration of energetic and logistical metrics. The modelling approach follows the recommendation of Perwitz et al. (2022) to create easily adaptable and configurable structures to efficiently generate a wide range of experimental setups. This condition is addressed by focusing on the adaption of many parameters that define the basic system behaviour. Hence, complex control algorithms for material transport or other special interests are not considered. The typical features of MPS reflect the main characteristics of the simulation platform. This includes a flexible work distribution, multiple and redundant work contents, automated and flexible product transport or variable processing times. The energetic infrastructure is integrated by modelling the energy consumption of processing and transport system. Based on Krückhans and Meier (2013), who compare different strategies to integrate energy consumption profiles into simulation environments, a state-based approach of mean values per operating state has been chosen to maintain simulation performance. Figure 3 gives an overview of the derived main characteristics to model MPS in a simulation environment and an insight into the manipulable parameters for the platform.

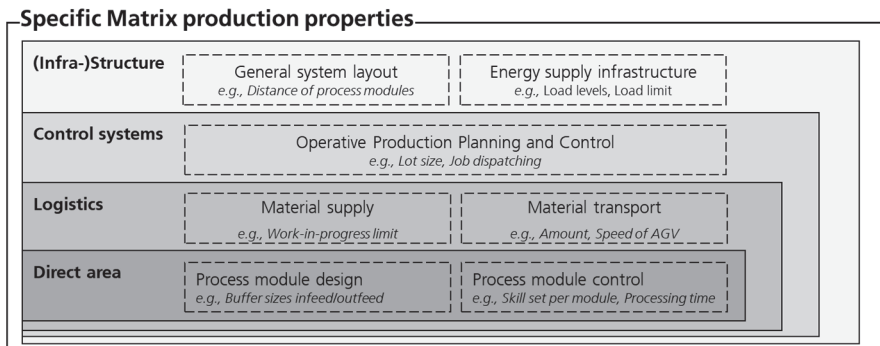


Figure 3: Properties for energetic simulation of MPS with examples (in italics)

The simulation platform is set up with the discrete-event simulation software Siemens Tecnomatix Plant Simulation (STPS). It employs the outlined characteristics and is based on a modular framework to configure various system variants and parameters and conduct experiments within a job-shop-oriented manufacturing system. The underlying use case from industrial context that was shown by (Stoldt et al., 2018) and has been adapted to a MPS design. According to the paradigms of energy flow simulation, discrete-event simulation with integrated evaluation of energy flows is applied (Thiede, 2012). Precisely, the state-based approach of STPS is has been

adopted to evaluate the energy consumption. The general principles of material flow and behaviour were verified during the setup of the model itself. This was conducted by continuous testing of methods and analysis of material flow behaviour in distinct experiments and analysis of key performance indicators, correlation matrices or visual verification during runtime. The framework and pipeline of the simulation platform for MPS is depicted in Figure 4.

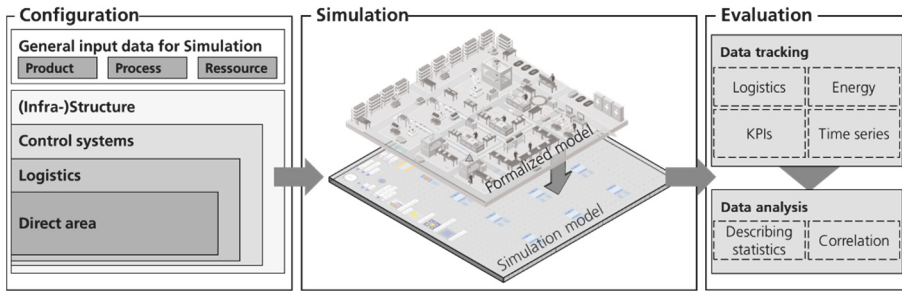


Figure 4: Simulation platform framework and process pipeline for MPS

The simulation is based on a work plan of various mechanical manufactured **products** such as drive shafts and gearing parts. They consist of several production steps ranging from one to seven steps. The **processes** are modelled according to the work plans from the products and include all the necessary manufacturing technologies. The **resources** are modelled generically by adopting a specific setup time for products on every process. Hence, resources for processing are assumed as always available.

The **Simulation** layer employs a generic design of process modules consisting of single production stations with input and output buffers. The material flow is modelled by an AGV fleet. Energetic data is modelled by skill-specific operating states. Setup processes are included, but breakdowns are not considered. Control logics allocate material from source to stations in a reactive manner. The general system layout is arranged in a rectangular order, according to other examples, e.g., by (Filz et al., 2019; Schönemann et al., 2015).

The **Configuration** layer includes a wide range of parameters that can be altered individually for every experiment. Within an experiment building block, these parameters are manipulable for every simulation run what allows to perform a high number of experiments with different configurations. To have better comparison between the simulation run of each experiment design, distribution functions for parameters were neglected. Hence, input parameters such as processing times or transport speed during a simulation run were not distributed.

The **Evaluation** layer of the model consists of data tracking and a data evaluation pipeline to gather detailed information about the energetic and logistic behaviour of the model. This includes time series tracking for load levels of the overall system as well as the analysis of specific key performance indicators such as peak load or specific energy consumption (SEC) per product. The latter is defined by the energy consumption of the overall system divided by the produced goods per simulation run and serves as a measure to compare different system configurations. Functions for data analysis include metric for correlation and describing statistics.

The **(Infra-)Structure** of the model includes the option to alter the general system layout by the amount and distance of the process modules or by choosing an individual layout. The energy supply infrastructure is modelled by a constant supply of energy. Hence, shortages on energy or additional infrastructure such as batteries or decentralized energy supply is not considered. To determine the energy consumption, the load levels for each available energetic state are integrated into the model and are adapted depending on the requested skill for each process module. Also, load limits for the overall system are configurable to determine their effects on logistical parameters. Furthermore, a pausing algorithm for process modules is integrated to shut down machines to energetically lower operating states when waiting for material. Load stations for AGV are configurable in number and loading capacity. Energy-oriented strategies for AGV and process modules are adaptable.

The **Logistics** in the model is realized by automated material transport with a fleet of AGV. Here, the speed and velocity as well as the amount of AGV in the system are configurable. With connection to the energy supply infrastructure, the battery properties of every AGV are individually configurable. Material supply relates to the limitation of work-in-progress in the overall system as flexible parameter. Specific strategies for intralogistics are not modelled in detail, the availability of material by the source is ensured during simulation runs by a dispatcher, that allocates the jobs in a push strategy to the system. The logistics of MPS is a topic of special interest that requires explicit strategies, as elaborated by Fries et al. (2020).

The **Direct area** as location of added value includes the process module control by varying the amount and type of skills or temporal aspects of product processing. Here, skills can be distributed randomly to stations by type and amount. The process module design includes the manipulation of the installed buffer capacities.

The **Control systems** for material flow refer to the operative production planning and control. This is realized by a variable number of parts being dispatched randomly with variable lot sizes. Here, process modules and respective work contents are chosen by rule-based strategies, e.g., least utilization of available process modules.

The combination of these parameters results in a combinatorial window of parameters that reflect various configurations of MPS. This includes systems with a high or low spread between processing and setup times, load levels of operating states, utilization of the transport and processing system or buffer capacities.

4 Experiment design and results

To test the simulation platform and give an insight into analysis workflow, an experimental study was conducted. The tested MPS design consists of eleven process modules where each has at least two different skills. Each simulation was stopped after 2.000+-10 parts due to the chosen lot sizes and the condition to release only complete batches. Here, a deviation from the configured part amount may appear if the division of part amount and lot size is not an even number. In that case, the simulation run was completed with a full batch of parts but a slight difference to the configured amount. For the configuration, six parameters were manipulated in a full-factorial design. These parameters are the pause control of process modules, the lot size, the number of AGV and respective load stations, the distance of process modules from each other and the speed of AGV. The remaining parameters were constant for

the experiments. The design aims to inspect the effects of the transport system on logistical and energetic performance and resulted in 20.384 experiments that were distributed to several workstation.

The analysis started with removing the invalid simulation runs. As a criterion for a successful simulation run without deadlocks, a threshold of at least 1.990 parts was set. This resulted in 12.628 valid runs, which is about 62% of total runs. A ramp-up phase of the system was not considered. The small system size and low buffer capacities led to a quickly obtained steady state. A boxplot was chosen to give an overview on measures of location and dispersion. The box itself visualizes the measures of 50% of overall measurements between the first and third quartile. The distance between bottom and top of the box (interquartile range) shows the distribution of these values. The line in the box, the median, divides the set of measurements in two equal sets that are ordered from low to high. Hence, below the median are the lower 50% and above the top 50% of measurements. The median gives information about if the distribution of values is right-skewed or left-skewed. Outside of the whiskers are outliers located as red points with more than 1,5x the size of the box. Figure 5 visualizes the box plots for the SEC as an energetic measure and overall simulation time as a logistic measure for system performance.

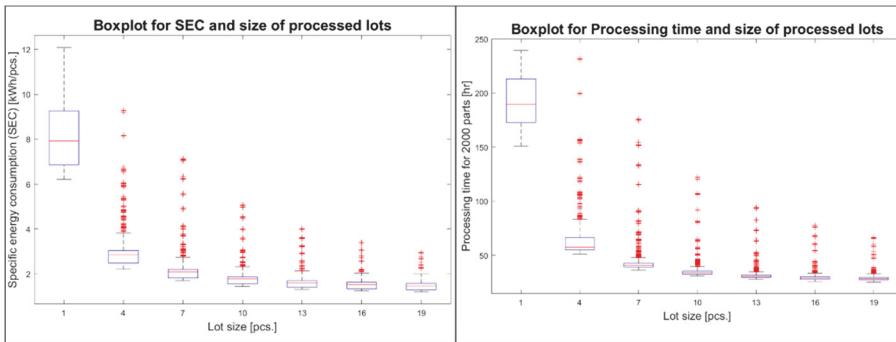


Figure 5: Results of varied lot sizes on SEC and overall simulation time

The results show the varied lot sizes ranging from one to 19 with equidistant steps of three parts, six levels in total. From an energetic perspective, the SEC reduces with increased lot sizes in the model. Furthermore, the size of the box and whiskers decrease, outliers do increase. The logistical perspective shows a reduction of simulation time that is equal to the reduction of the SEC. Both point towards a lower barrier with increasing lot sizes. Also, the box and whiskers decrease in size, the outliers do increase as well. Furthermore, the rate of around 62% of successful experiments point is a result of deadlocks. Here, strategies such as limits for work-in-progress or peak loads seem beneficial to increase valid runs.

5 Conclusion and Outlook

A simulation platform for the analysis of energetic considerations in MPS is introduced. This includes an overview on existing works in the field of simulation of MPS that show shortcomings in the analysis of energetic key behaviour and control

strategies of MPS. Hence, matrix-specific configuration parameters were derived from existing approaches and implemented in a simulation platform that allows it to manipulate them in an easily configurable and replicable process. This allows it to conduct a wide range of experiments to collect and analyse a wide range of data. A first experiment design is introduced to investigate the influence of lot sizes on SEC and simulation time. A box plot is chosen to analyse measures of location and dispersion. SEC and simulation time reduce incrementally towards a lower barrier.

Future works from a technical perspective include the further implementation of parameters as well as the management of dead locks. From an analytical view, the results will be analyzed more in depth and further experimental studies are conducted to elaborate the understanding of energetic behaviour of MPS. The methodical view includes future works to derive best-practices when designing and controlling MPS from with energy-oriented production and system design targets.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the project “InTeleMat” (02L21B520) by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the project supervision by Projektträger Karlsruhe (PTKA).

References

- Bauernhansl, T.: *Fabrikbetriebslehre 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020.
- Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hrsg.): *Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020.
- Echslar Minguillon, F.: *Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2020.
- Filz, M.-A.; Gerberding, J.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Analyzing different material supply strategies in matrix-structured manufacturing systems. *Procedia CIRP* 81 (2019), pp. 1004–1009.
- Filz, M.-A.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Simulation-based Data Analysis to Support the Planning of Flexible Manufacturing Systems. *SNE Simulation Notes Europe* 30 (2020) 4, pp. 131–137.
- Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Changeable Assembly Systems Through Flexibly Linked Process Modules. *Procedia CIRP* 41 (2016), pp. 230–235.
- Foith-Förster, P.C.: *Design of matrix production systems for the personalized production of mechatronical machine modules*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Dissertation, 2022.
- Fries, C.; Wiendahl, H.-H.; Assadi, A.A.: Design concept for the intralogistics material supply in matrix productions. *Procedia CIRP* 91 (2020), pp. 33–38.
- Greschke, P.: *Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2015.
- Greschke, P.; Schönemann, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems. *Procedia CIRP* 17 (2014), pp. 160–165.

- Kern, W.: *Modulare Produktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2021.
- Kouki, M.; Cardin, O.; Castagna, P.; Cornardeau, C.: Input data management for energy related discrete event simulation modelling. *Journal of Cleaner Production* 141 (2017), pp. 194–207.
- Krückhans, B.; Meier, H.: *Industrie 4.0–Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion* 2013.
- Kurle, D.; Blume, S.; Zurawski, T.; Thiede, S.: Simulative Assessment of Agent Based Production Planning and Control Strategies. *Procedia CIRP* 57 (2016), pp. 439–444.
- Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals* 65 (2016) 2, pp. 621–641.
- Müller, T.; Jazdi, N.; Weyrich, M.: Intelligentes Rekonfigurationsmanagement selbstorganisierter Produktionssysteme in der diskreten Fertigung. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *Automation 2020: Shaping Automation for our Future*. Düsseldorf: VDI Verlag 2020, pp. 517–530.
- Perwitz, J.; Sobottka, T.; Beicher, J.-N.; Gaal, A.: Simulation-based evaluation of performance benefits from flexibility in assembly systems and matrix production. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 693–698.
- Roemer, A.C.; Strassburger, S.: A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production. In: *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, Washington, DC, USA, 2016, pp. 1416–1427.
- Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P.; Thiede, S.: Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015), pp. 104–112.
- Schukat, E.; Rachner, J.; Maidl, A.; Göppert, A.; Adlon, T.; Burggräf, P.; Schmitt, R.H.: *Agent-based Order Release In Matrix-Structured Assembly Systems* (2022).
- Stoldt, J.; Münnich, M.; Franz, E.; Schlegel, A.; Putz, M.: Simulative Untersuchung energie-und ressourceneffizienter Betriebsstrategien in der E3-Forschungsfabrik. In: Wiedemann, T. (Hrsg.): *Tagungsband ASIM 2016*, Dresden, 2018, pp. 45–52.
- Thiede, S.: *Energy efficiency in manufacturing systems*. Berlin, New York: Springer 2012.
- Thiede, S.: Digital technologies, methods and tools towards sustainable manufacturing: does Industry 4.0 support to reach environmental targets? *Procedia CIRP* 98 (2021), pp. 1–6.
- Thiede, S.: *Cyber Physical Production Systems and Their Role for Decarbonization of Industry*. In: Inderwildi, O.; Kraft, M. (Hrsg.): *Intelligent Decarbonisation*. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer 2022, pp. 75–86.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. *VDI 3633 - 1: VDI 3633 - Blatt 1. Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2014.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Entwicklung und Realisierung einer Modellbibliothek für ein Entscheidungsunterstützungssystem in der Kalksandsteinproduktion

***Development and Realisation of a Model Library for a Decision Support
System in Calcium Silicate Brick Production***

Tobias Schrage, Peter Schuderer,
TH Ingolstadt, Ingolstadt, Germany
{tobias.schrage, peter.schuderer}@thi.de

Martin Barth, Jörg Franke
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Germany
{martin.barth, joerg.franke}@faps.fau.de

Abstract: The digitization in the context of the fourth industrial revolution provides new opportunities for value chains and the optimal design of production. Simulation is discussed as a valuable tool for production planning and control in cases where modeling and analysis require significant computational effort. Simulation helps determine production times and costs under varying buffer sizes, machine performance, cycle times, and batch sizes, as they are present for calcium silicate brick production. Meanwhile, energy is increasingly becoming a factor in the resource-oriented management of companies. In case of resource-oriented production planning and control is becoming a survival factor. Therefore, for a simulation-based decision support system for production planning in the calcium silicate brick industry, a model library for material flow simulation is extended and tested based on 5 reference plants.

1 Motivation und Problemstellung

Die Digitalisierung bietet neue Möglichkeiten für Wertschöpfungsketten und die optimale Gestaltung der Produktion, unter dem möglichen Einsatz von Simulation zur Produktionsplanung und -steuerung (Wenzel 2018). Unter den Rahmenbedingungen von variierbaren Pufferdimensionierungen, Maschinenleistungen, Taktzeiten und Losgrößen unterstützt die Simulation bei der Ermittlung von Produktionszeiten und –kosten (Bracht et al. 2018). Zeitgleich werden die wirtschaftlichen Aktivitäten von

Unternehmen zunehmend durch den Wettbewerbsfaktor Energie in der ressourcenorientierten Steuerung von Unternehmen bestimmt (Dyckhoff 2018; Rackow et al. 2013). In der Herstellung des Baustoffs Kalksandstein (KS) treffen eine hohe Variantenvielfalt und chargenstützte, hybride Fertigungsprozesse auf einen jährlichen Energiebedarf von etwa 800 Gigawattstunden (GWh), womit die KS-Industrie für 0,7% aller industriebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich ist (Umweltbundesamt Mai 2021). Zusammenfassend besteht der ökologische wie ökonomische Handlungsbedarf darin, den Herstellungsprozess für KS produktiver und ressourcenorientierter zu gestalten, um somit die Herstellkosten nachhaltig zu reduzieren und die geforderte Klimaneutralität bis 2045 (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. 2021) zu erreichen. Entscheidungsunterstützungssysteme in der Produktionssteuerung dienen der Zielerreichung. Die verfügbaren finanziellen Mittel und das vorhandene Know-how in der von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) geprägten Branche erfordern eine aufwandsarme Integration. Eine Lösungsmöglichkeit mittels modularer Modellbibliothek wird am Beispiel der aufgeführten KS-Herstellung dargelegt.

2 Stand der Technik

2.1 Simulationsgestützte Planung in der KS-Industrie

Der Herstellungsprozess von KS besteht aus fünf Prozessschritten. Im ersten Schritt werden die gelagerten Rohstoffe Kalk, Sand, Wasser und Zuschlagstoffe nach einer sortenspezifischen Rezeptur dosiert und im Mischer vermengt. Anschließend löst der mit Wasser und Sand versetzte Branntkalk (CaO) in einer exothermen Reaktion im Reaktor ab. Nach Abschluss dieses Vorgangs und Einstellung der Pressfeuchte werden die Rohlinge durch Pressen urgeformt. Anschließend werden sie in einer Wasserdampfatmosphäre autoklaviert, um die erforderliche Festigkeit zu erreichen. Nach dem Abdampfen werden die fertigen Steine in der Verpackungsanlage zu transportfähigen Steinpaketen gebündelt und schließlich eingelagert. Es handelt sich insbesondere um einen hybriden Produktionsprozess mit dem Übergang von Schüttgut zu Stückgut und stark schwankenden Taktzeiten.

Eine erste Konzeption eines Entscheidungsunterstützungssystem (engl. Decision Support System, DSS) für die KS-Produktion wurde von (Donhauser 2020) entwickelt. Das DSS basiert auf einer simulationsbasierten Integration von spezifischen Prozessen, thermodynamischen Zusammenhängen und produktivitätssteigernden Optimierungsansätzen in der KS-Produktion (Abbildung 1).

Eine praxistaugliche Realisierung und Validierung des bestehenden Konzeptes ist bisher nicht erfolgt und stellt den Forschungsbedarf vor der Entwicklung für den industriellen Einsatz dar. Vor dem geschilderten Hintergrund ist es das Ziel dieses Beitrags, ein simulationsgestütztes DSS für mehrere ausgesuchte KS-Werke zu realisieren, um eine Produktionsplanung und Energiebetrachtung mit geringem Bedien- und Implementierungsaufwand in der klein- und mittelständisch geprägten und kostenorientierten KS-Industrie zu entwickeln. Dazu müssen die digitalen Voraussetzungen in der KS-Produktion, eine effiziente, verifizierte und validierte Modellierung von KS-Werken sowie die Integration des DSS in die

Produktionssteuerung untersucht werden. Weiterhin sind bislang die Schritte zur Einführung eines DSS in KS-Werken nicht einheitlich definiert worden.

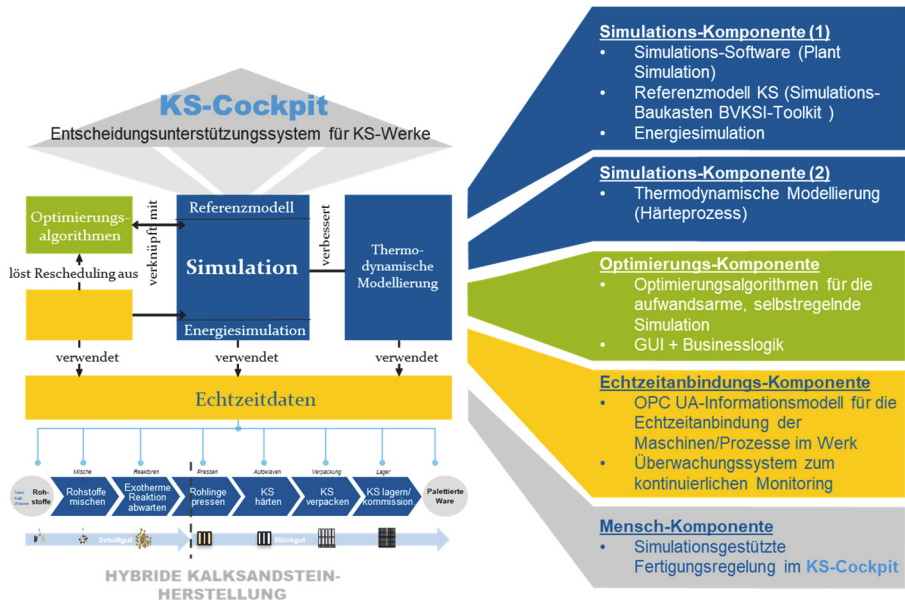


Abbildung 1: Die ressourcenorientierte Auftragsregelung im KS-Cockpit als Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) i.A. an (Donhauser, 2020)

2.2 Ansätze zur simulationsbasierten Produktionsplanung und -optimierung

Forschungsansätze zur simulationsgestützten Produktionsplanung bringen eine Verknüpfung von analytischen Optimierungsverfahren und Discrete Event Simulation (DES) auf (Hanschke und Zisgen 2015; Claus et al. 2021; Donhauser 2020). Die Forschergruppe um Almeder und Gansterer (2021) legt hohen Wert auf eine schlanke und leistungsfähige Simulationsengine, um für einen operativen Einsatz der Simulation akzeptable Laufzeiten zu erreichen. Allerdings besteht in der Datenanbindung noch Forschungsbedarf und die Auswahl der abgebildeten nicht-linearen Zusammenhänge hat einen entscheidenden Einfluss auf den Optimierungsalgorithmus (Almeder und Gansterer, 2021).

Kück et al. (2016, 2017) entwickeln in diesem Kontext ein echtzeitbasiertes, simulationsgestütztes Optimierungsverfahren, um für einen aktuellen Produktionszustand optimale Priorisierungsregeln abzuleiten. Letztlich wird ein Simulationsmodell über eine MES-Schnittstelle an den realen Produktionszustand angepasst und einzig für die Bewertung von Ergebnissen eingesetzt. Eine Anpassung an ungeplante, spezifische Planabweichungen ist nicht vorgesehen und die Anbindung von Echtzeitdaten ist den Veröffentlichungen nur auf konzeptioneller Basis zu entnehmen (Kück et al. 2016, 2017).

Für einen kurzfristigen Planungshorizont im Kontext der Halbleiter- und Elektronikproduktion legen Klemmt et al. (2011) den Fokus auf eine Kombination automatisch generierter Simulationsmodelle mit prioritätsbasierten und exakten Lösungsverfahren unter Berücksichtigung von aktuellen Produktionsdaten. Die Neuplanung wird durch den Nutzer initiiert und basiert auf dem zuletzt in einer Datenbank abgelegten Produktionszustand, eine gesonderte Validierung aktueller Produktionsdaten findet dabei nicht statt (Klemmt et al. 2011). Ähnlich zur Autoklavierung in der KS-Herstellung werden Ofenprozesse mit Chargenbearbeitung simulationsbasiert optimiert, wobei fixe anstelle thermodynamikabhängiger Bearbeitungszeiten angesetzt werden.

Insgesamt ist die Betrachtung von Energieverbräuchen und -vorhersagen in Materialflusssimulationen stark anwendungsfallbezogen und branchenspezifisch (Kulus et al. 2011; Schacht und Mantwill 2012). Eine allgemeinere Methode zur Messung des Energieverbrauchs liegt in der Form eines Methodenbausteins für Tecnomatix Plant Simulation vor, welche über Modelländerungen hinweg funktional bleibt (Spreng et al. 2013).

3 Forschungs- und Projektergebnisse

Eine Definition der informationstechnisch abzubildenden Komponenten hat im Ergebnis des Projekts *Ressourcenorientierte Auftragsregelung hybrider Produktionen mittels betriebsbegleitender Simulation (ReProSi)* zu einem Baukastensystem (Donhauser et al., 2015) geführt und weiteren Forschungsbedarf detektiert. Die technischen Voraussetzungen in den KS-Werken sind nicht untersucht und müssen für die Einführung eines DSS vorbereitet werden. In einem ersten Schritt wird der Stand der Digitalisierung in der KS-Produktion analysiert und Fallstudienwerke ausgewählt. Im zweiten Schritt erfolgt die Werksmodellierung und die Analyse des weiteren Forschungsbedarfs aus der Differenz zwischen methodisch umsetzbaren Modellierungen und nach Expertenmeinung wesentlichen Abbildungen des realen Systemverhaltens. Der dritte Schritt umfasst die Anwendung und Integration des DSS entlang der ausgewählten Fallstudien sowie eine Verifikation und Validierung der entwickelten Modellbibliothek durch KS-Experten.

3.1 Umfrage Digitalisierungscheck

Die Einführung eines DSS in Produktionssystemen setzt einen Digitalisierungsgrad voraus, die informationstechnischen Strukturen in der KS-Industrie erfordern eine vorherige Bestandsaufnahme. Mit einem Digitalisierungscheck wurde die Informations- und Technologieverfügbarkeit in der KS-Industrie erfasst und fünf teilnehmende Werke für die Validierung ausgewählt.

In Anlehnung an das Modell des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) für KMUs (Anderl; Fleischer, 2015) wurde in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. ein Digitalisierungscheck adaptiert. An der Beantwortung der Fragestellungen haben 14 KS-Werke teilgenommen. Kern der Befragung waren Möglichkeiten der Datenaufnahme und -verarbeitung, Schnittstellen, sowie die Digitalisierung innerhalb der Produktionsplanung.

Zusammenfassend zeigt der Digitalisierungscheck, dass die Mehrzahl der teilnehmenden KS-Werken Produktionsdaten in allen Prozessstufen mit Ausnahme

der Reaktoren verarbeitet. Es erfolgen Speicherungen, Auswertungen zur Prozessüberwachung sowie automatische Prozesssteuerungen. Die Daten werden über Feldbusschnittstellen und Industrial Internet übertragen und überwiegend auf einem zentralen Datenserver gespeichert, sofern eine Datenspeicherung erfolgt. Dem Bedienpersonal steht an allen Prozessschritten ein lokales Anzeigergerät oder eine zentrale Produktionsüberwachung zur Verfügung. Die Auftragsplanung erfolgt überwiegend manuell in einer Tages- und Spontanplanung. Störungen werden an allen Prozessschritten überwiegend automatisch erkannt und manuell behoben. Die digitale Integration von Informationen aus der Produktionsperipherie, wie z.B. Auftragsdaten, findet selten Anwendung.

3.2 Modellbildung und Teilmodelle der KS-Werke

Auf Basis des durchgeführten Digitalisierungschecks werden unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit, der System- und Steuerungsschnittstellen sowie der Verfügbarkeit eines auf die KS-Industrie übertragbaren Maschinen- und Anlagenparks fünf Fallstudienwerke für die Modellierung und Validierung der generischen und allgemeingültigen Modellbibliothek ausgewählt.

Basierend auf dem Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien nach (Rabe et al. 2008) wurden für die definierten KS-Werke spezifische Bausteine zur Modellierung des KS-Fertigungsprozesses mit der Simulationssoftware Plant-Simulation entwickelt. Zur Unterstützung der Modellierung wird das Gesamtsystem nach Submodellen in die einzelnen Fertigungsschritte untergliedert. Dazu zählen die Teilsysteme Mischer, Reaktoren und Pressen, Autoklaven und Verpackung, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

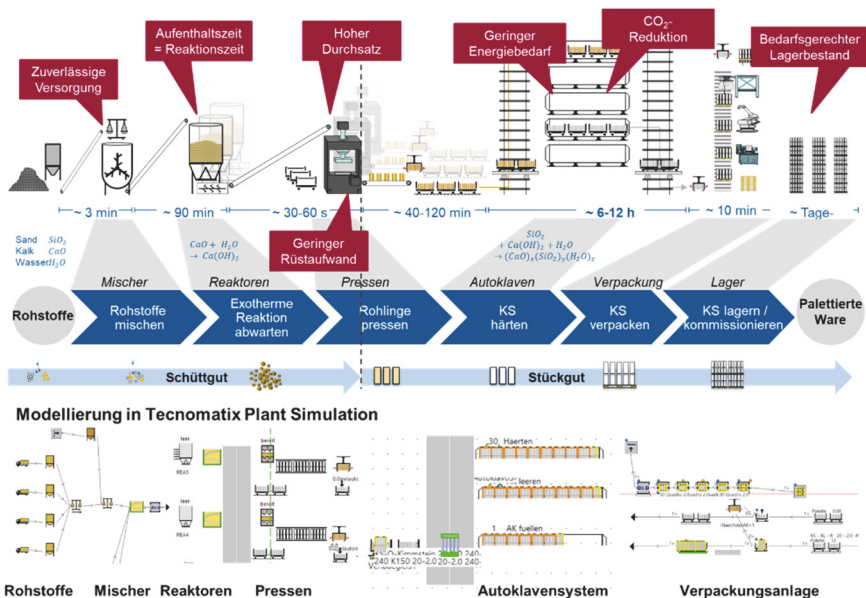


Abbildung 2: KS-Produktionsprozess und Modellbibliothek für effiziente KS-Werksmodellierung

Für die Parametrisierung der spezifischen Kalksandsteinwerke werden die erforderlichen Rohdaten von den Fallstudienpartnern bereitgestellt und in enger Zusammenarbeit für die Verwendung in der Simulation aufbereitet. Insgesamt lassen sich die benötigten Daten in Betriebsdaten, Prozessdaten und Produktdaten kategorisieren. Betriebsdaten beziehen sich dabei auf die Produktionssteuerung und Störungsabbildung. Prozessdaten umfassen statische und dynamische Größen von Maschinen und Anlagen. Dazu gehören Abmessungen und Volumina sowie Taktzeiten, Rüstzeiten und Verfügbarkeiten. Produktdaten definieren die Kalksandsteine einschließlich der Rohstoffzusammensetzung und bilden das Produktionsprogramm ab.

Für die Simulation der Energiemengen gehört die Ermittlung des elektrischen Verbrauchs zur Standardfunktionalität von Tecnomatix Plant Simulation, während der Gas- und Ölverbrauch sowie exotherme Reaktionen anderweitig modelliert werden müssen. Jedes Teilmodell sowie das Gesamtmodell werden anhand historischer Realdaten und Experteninterviews verifiziert und validiert.

Das Teilmodell Mischerei besteht ausschließlich aus Schüttgütern. Dieses Teilmodell beinhaltet die Simulation des Ressourcenverbrauchs je nach Rezeptur der im Produktionsprogramm hinterlegten Produkte. Das Teilmodell Reaktoren und Pressen modelliert den Energieverbrauch bei der exothermen Reaktion von Kalk, Sand und Wasser und modelliert den Übergang von Schüttgut zu Stückgut. Dazu wurde eine laufzeiteffiziente Modellierung des Übergangs von Schüttgut zu Stückgut integriert.

Das Teilmodell Verschiebebühne und Autoklaven modelliert die Produktionslogistik der Kalksandsteine zwischen den Pressen und den Autoklaven sowie den Härteprozess in den Autoklaven. Die Prozesszeit in den Autoklaven wird durch produktspezifische Härtekurven bestimmt, die im Simulationsmodell hinterlegt sind. Die Modellierung des Energieverbrauchs ist nicht trivial und unterliegt physikalischen thermodynamischen Wechselwirkungen.

Das Teilmodell Verpackung berücksichtigt die Palettierung und Bündelung, um die Produkte versandfertig zu machen.

Die beschriebenen Teilmodelle ermöglichen eine effiziente Werksmodellierung, bei der nur Anpassungen im Detail erforderlich sind. Das Projektteam hat für die Modellierung der Fallstudienwerke zwischen fünf und zehn Arbeitstage aufgewendet. Ein Zwischenergebnis besteht in der Erkenntnis, dass die Werksmodellierung aus einem Baukastensystem effizient durchgeführt werden kann, jedoch Anwender mit wenig Simulationserfahrung die Modellierung nicht eigenständig durchführen und ein Anwendungsfall für das Entscheidungsunterstützungssystem erst nach erfolgter Modellierung, Validierung und Implementierung in der Nutzung für die Werke der KS-Industrie besteht.

3.3 Einsatzmöglichkeiten der KS-Simulationsbibliothek

Die beschriebene Modellbibliothek ermöglicht eine aufwandsarme Modellierung und Integration eines DSS in KS-Produktionssysteme. Die zu erreichenden Planungsziele sind in Abbildung 2 an den jeweiligen Prozessschritten aufgeführt und umfassen neben den gängigen ökonomischen und ökologischen Analysen und Optimierungen entlang der Prozesskette, insbesondere die Sicherstellung der Rohstoffversorgung der Mischer, der optimalen Belegung der Reaktoren entsprechend der chemischen

Reaktionszeit sowie die Minimierung des Energiebedarfs der Autoklaven durch Belungsoptimierung und Energiewiederverwendung.

Während Mischer und Reaktor mit Standardelementen modelliert werden können, sind insbesondere im Teilmodell Pressen und Autoklaven die Besonderheiten von chargengestützten und energieintensiven Produktionsprozessen zu berücksichtigen. Der Autoklavierprozess ist mit einer Dauer von bis zu 12 Stunden zudem der Taktgeber in der KS-Produktion. Die Pressen sind häufig nicht durch Puffer von den Autoklaven entkoppelt.

Im Pressenverbund ist ein Algorithmus zur Ermittlung der rüstzeitoptimalen Auftragsreihenfolge implementiert. Dabei werden die Aufträge zunächst nach ihrem Steinformat sortiert, um gleichartige Aufträge auf mehreren Pressen für den Betrachtungszeitraum auszuschließen. Anschließend wird die Rüstzeit pro Presse und Auftrag ermittelt. Eine Rüstzeitmatrix wird bei der Modellparametrisierung im Bereich der Produktionsdaten hinterlegt. Die Rüstzeit geht dann in die Presszeit des jeweiligen Auftrags ein. Rüstzeit und Presszeit gehen in eine Zielfunktion ein, mit der der Lösungsraum der möglichen Auftragsreihenfolgen bewertet wird. Der Auftrag mit dem niedrigsten Zielfunktionswert wird in einer zuvor automatisch erstellten Kopie des Simulationsmodells simuliert und anschließend in das Hauptmodell zurückgeführt. Der Zielfunktionswert setzt sich aus den gewichteten Komponenten Rüstzeit, Presszeit, Wartezeit Härtewagen, Härtezeit, Auslastung, Durchlaufzeit Autoklaven, Anzahl von fertiggestellten Autoklaven, Anzahl von fertiggestellten Verpackungseinheiten und Gesamtdurchlaufzeit zusammen. Entsprechende Gewichtungen sind parametrierbar. Aus den Einflussgrößen auf die Zielgröße ist bereits ersichtlich, dass eine analoge Erweiterung der Reihenfolgeoptimierung auf nachfolgende Prozessschritte in Weiterentwicklungen umgesetzt werden kann.

Im Bereich des Autoklavierprozesses werden verschiedene Strategien zur Beschickung der Autoklaven modelliert. Aufgrund der großen Unterschiede in der Zykluszeit zwischen Pressen (ca. 40-60 Sekunden) und Autoklaven (ca. 6-12 Stunden) produziert eine Presse für mehrere Autoklaven. Eine optimale Strategie kann als Kernproblem der Produktionssteuerung in der KS-Produktion angesehen werden. Sofern die Autoklaven mit gemischten Steinsorten beschickt werden, besteht die Entscheidungsmöglichkeit einer zyklischen oder schnellstmöglichen Beschickung. Sofern eine sortenreine Beladung der Autoklaven gewählt wird, muss eine Festlegung über das Entscheidungskriterium der Sortenreinheit nach Steinsorte, Steinformat, Härtekurve oder Verpackungsform gewählt werden. Eine algorithmische Optimierung dieses Prozessschrittes ist derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Herstellung von KS ist, wie bereits erwähnt, die Entscheidungsgröße Energieverbrauch und CO₂-Einsparung. Während die Simulation des elektrischen Energieverbrauchs bereits beschrieben wurde, kann das energieintensive Dampfsystem zur Autoklavierung der Kalksandsteine überwiegend mit den fossilen Brennstoffen Gas und Heizöl betrieben werden. Zur Ermittlung des Energieverbrauchs mittels Simulation ist eine thermodynamische Modellierung des Dampf- und Autoklavensystems erforderlich. Aktuelle Ansätze schlagen eine Kombination mit analytischer Beschreibung und mathematischer Optimierung oder die Integration von Strömungssimulation als hybride Simulation vor (Donhauser, 2020). Auf Grundlage der verwendeten objektbasierten Simulation sind die Informationsträger an das Simulationsobjekt Kalksandstein geknüpft. Letztlich liegt

keine abschließende physikalisch-thermodynamische Modellierung des Härteprozesses von Kalksandsteinen vor (Eden; Steinmann 2010), was eine Modellierung für den vorliegenden Anwendungsfall erschwert.

Für den Anwendungsfall der Ermittlung von Steuerungsparametern für eine energieoptimierte Produktion werden in der heutigen KS-Produktion die Autoklaven in der An- und Abfahrphase zusammenschaltet, um eine Wiederverwendung des Dampfes zu ermöglichen. Diese Steuerungsunterstützung basiert auf Erfahrungswissen und droht aufgrund des Fachkräftemangels in Zukunft zu entfallen. Eine Modellierung des Autoklavierprozesses sowie des Verhaltens eines Autoklavensystems ist Voraussetzung für die Integration von Optimierungslösungen in ein Entscheidungsunterstützungssystem. Anschließend können Optimierungen in der KS-Fertigung ermittelt werden. Die Modellierung des Aushärteprozesses und des Verhaltens im Autoklavensystem stellt einen aktuellen Forschungsbedarf dar.

Erste Modellrechnungen mit den ausgewählten Kalksandsteinwerken ergeben eine mögliche Energieeinsparung durch die optimierte Steuerung eines Systems aus mehreren Autoklaven zur Dampfwiederverwendung um 20%. Bezogen auf den aktuellen Gaspreis von 0,10€/kWh (Stand März 2023) ist mit einer Einsparung von bis zu 2,0€ pro Tonne und 16 Mio. € pro Jahr über alle Werke der Kalksandsteinindustrie in Deutschland zu rechnen. Derzeitige Ergebnisse beziehen sich auf Entscheidungen zur Beladungsreihenfolge der Autoklaven. Ein Optimierungsalgorithmus mit der Zielgröße Energieverbrauch stellt weiteren Forschungsbedarf.

Die durchgeführten Experteninterviews mit den ausgewählten KS-Werken bestätigen die Notwendigkeit der aufgeführten Punkte und den Nutzen des modularen Simulationsbausteinbaus sowie des Entscheidungsunterstützungssystems für die Produktionssteuerung und bekräftigen insbesondere drei zentrale Anwendungsfälle.

1. Reaktion auf Störungen und Anlagenausfälle
2. Optimierung der Produktionsprogrammplanung zur Produktivitätssteigerung
3. Ermittlung von Steuerungsparametern für energieoptimale Produktion

Nach erster Anwendung des Baukastens auf die Produktionsplanung der Kalksandsteinwerke konnte eine Produktivitätssteigerung der Autoklaven durch die optimierte Gestaltung des Produktionsplans mit Hilfe des simulationsgestützten DSS um 30% realisiert werden, indem Produktionspläne mittels oben beschriebenem Optimierungsalgorithmus zur Reduzierung von Rüstzeiten im Prozessschritt Pressen ermittelt wurden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag gliedert sich in die Entwicklung und Realisierung einer Modellbibliothek für ein DSS zur ressourcenorientierten Produktion von Kalksandsteinen. Bevor eine erfolgreiche und aufwandsarme Integration eines DSS in den KS-Werken erfolgen kann, ist eine detaillierte Auseinandersetzung mit verfügbaren Daten und Schnittstellen mittels Digitalisierungsscheck erforderlich.

Es liegt eine Modellbibliothek mit spezifischen Teilmodellen zur Modellierung von KS-Produktionen vor. Dabei sind allgemeingültige Maschinen- und Anlagen in ihrer logistischen und energetischen Verknüpfung modelliert. Optimierungsalgorithmen für die Produktionsprogrammplanung auf Entscheidungsbasis von Rüstzeiten wurden

ebenfalls integriert und durch erste Nutzung mit ausgewählten KS-Werken qualitativ validiert. In weiteren Forschungstätigkeiten ist die Optimierung der Energiebetrachtung insbesondere in den Autoklavensystemen zu erweitern. Nichtlineare Abhängigkeiten von thermodynamischen Wechselwirkungen erfordern eine Lösungsintegration von analytischen Modellen, hybrider Simulation oder der Integration Künstlicher Intelligenz (KI).

Zusätzlich zu den bisherigen Modellversuchen mit ausgewählten KS-Werken soll in einer zweiten Validierungsphase eine größere Gruppe von Fallstudien ausgewählt werden. Weiterhin ist die Adaption der entwickelten Lösungen auf ähnliche hybride Produktionen in der Herstellung von Baustoffen, Komposit-Materialien und Lebensmittelindustrie zu validieren.

Literatur

- Almeder, C.; Gansterer, M.: Robuste operative Planung. In: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2021, S. 63–78.
- Anderl, R.; Fleischer, J.: Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Unter Mitarbeit von Beate Stahl, 2015,
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018.
- Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2021): Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland: Eine Studie für den Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., von FutureCamp Climate GmbH.
- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2021.
- Donhauser, T.: Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation. Erlangen, FAU University Press, Dissertation, 2020.
- Donhauser, T.; Eden, W.; Franke, J.; Jung, T.; Schuderer, P.: Entwicklung einer Methodik zur ressourcenorientierten Steuerung der Werksprozesse in der Kalksandstein-Industrie: „KS-Sim“. Hannover 2015.
- Dyckhoff, H.: Produktion und Umwelt. In: Corsten, H.; Gössinger, R.; Spengler, T. (Hrsg.): Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken. Berlin: DeGruyter 2018, S. 949–975.
- Hanschke, T.; Zisgen, H.: Verknüpfung von Simulation und Optimierung: Kategorien und Beispiele – Ein Bericht über die VDI Richtlinie 3633 Blatt 12. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in production and logistics, Dortmund, 2015, S. 111–118.
- Klemmt, A.; Horn, S.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 49–63.
- Kück, M.; Becker, T.; Freitag, M.: Emergence of Non-predictable Dynamics Caused by Shared Resources in Production Networks. *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 520–525.

- Kück, Mirko, Boda, Eike; Freitag, M.: Toward adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control. In: Chan, Wai Kin et al. (Hrsg.): Winter Simulation Conference: 2017 Winter Simulation Conference : WSC turns 50: simulation everywhere! : December 3-6, 2017, Red Rock Casino Resort & Spa, Las Vegas, NV, Las Vegas, NV, 2017,
- Kulus, D.; Wolff, D.; Ungerland, S.; Dreher, S.: Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 9, S. 585–589.
- Rackow, T.; Schuderer, P.; Franke, J.: Green Controlling - Ressourcenorientierte Steuerung von Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 10, S. 773–777.
- Schacht, M.; Mantwill, F.: Unterstützung des Planungsprozesses im Karosseriebau durch Energieverbrauchssimulation 107 (2012) 4, S. 207–211.
- Spreng, S.; Kohl, J.; Franke, J.: Automatisierte Erweiterung bestehender Materialflusssimulationen durch Energieaspekte. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 9, S. 647–651.
- Umweltbundesamt (Mai 2021): Treibhausgasemissionen 2020: Emissionshandlungspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2020).
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg.): Modellierung logistischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018, S. 2–32.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation of a Factory for the Integrated Manufacturing and Remanufacturing of Batteries

Simulation einer Fabrik zur integrierten Herstellung und Wiederaufarbeitung von Batterien

Leonard Overbeck, Finn Brunnenkant, Oliver Brützel, Gisela Lanza
wbk Institute of Production Science, KIT, Karlsruhe (Germany);
leonard.overbeck@kit.edu

Abstract: The current trend of increasing usage of batteries in electro-mobility and other applications can only be ecologically and economically sustainable if the batteries are not disposed at the end of their lifecycle but re-entered into the value chain. To benefit from the economies of scale, the re-introduction of the used batteries (or their components) into the linear manufacturing system would be favourable. This poses new, complex challenges to production planning and control, which can be tackled with the help of discrete event simulation (DES). For its application in an integrated factory which includes common linear production and circular processes, new modelling and control approaches are needed. These approaches are presented in this paper, applied to a planned production system in a research environment, and used for performing experiments, which give deeper insights into the requirements and economic viability of the integrated manufacturing and remanufacturing of batteries.

1 Motivation

Battery technology is globally on the rise, also in Europe and Germany where many production facilities will be established in the upcoming years (Eddy et al., 2019). This is only ecologically sensible if the batteries will re-enter the value stream after usage because they contain rare, dangerous, and toxic materials, for example manganese, nickel, cobalt, and lithium. Furthermore, Europe must reuse these materials to become less dependent on imports. The ultimate goal would be a circular factory where new batteries are built side-by-side with the remanufacturing (which includes dis- and reassembly (Wurster et al., 2022)) of used batteries. This has the potential to re-introduce still functioning components from old batteries directly in the manufacturing process of new batteries and thus save material, money, energy, and effort.

2 Related work

The analysis of the so-called ReX processes (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Recycle, etc.) in general has been of increasing interest in research in the last years because it will be a key requirement for a truly green economy.

Research by Kampker et al. (2021) on the ReX of lithium-ion batteries (LIBs) showed that different disassembly degrees are possible at pack, module, and cell level, with cell-level disassembly being optimal according to their study. Fleischer et al. (2021) illustrated the technical feasibility of disassembling battery packs fully automated to defined levels, while Wurster et al. (2022) presented a control algorithm for a hybrid battery disassembly factory with manual and autonomous workstations.

Work on simulating the cost and energy requirements in linear battery production was carried out by Ventura Silva et al. (2022). Simulation was used by Alfaro-Algaba and Ramirez (2020) to identify the optimal disassembling process for remanufacturing LIBs. While minimizing the disassembling costs, the authors consider the costs for remanufacturing as constant and do not model the manufacturing processes.

The organization of ReX processes and manufacturing, i.e. forward and backward material flows under the same roof, is defined as a circulation factory by Cerdas et al. (2015), where complex material flows are identified as a challenge. Looking at simulations in integrated remanufacturing the existing research can be divided into approaches modelling parameters on network level and on factory level. Approaches on network level include the research of Deveci et al. (2021) regarding optimal locations for recycling plants, Standridge and Hasan (2015) investigating the general demand of remanufacturing capacities, and the investigation of future scenarios of LIB demand by Huster et al. (2022). A framework for DES for integrated remanufacturing on factory level was presented by Wakiru et al. (2021), who focus on logistic costs of spare parts where costs of labor and machines are considered as a constant factor for each remanufactured part. Although the presented publications deal with simulation of disassembling battery packs or simulation of circular remanufacturing, no researcher captures the disassembling and (re)assembling processes in one model. Instead, the costs of reassembling are considered to be constant and no analysis of machine utilization and overall machine effectiveness are performed. But such key performance indicators (KPIs) are crucial for the accurate planning and dimensioning of such factories.

There is a research gap concerning the integrated consideration of manufacturing and ReX in one plant. The goal of this paper is to close this gap and use discrete-event simulation to evaluate the potential of the integration of LIB manufacturing and remanufacturing of battery cells in one plant.

3 Approach

Closing the research gap, this paper presents a DES model of an integrated manufacturing and remanufacturing factory that allows the performance analysis of each single process unit. The approach follows the guideline for simulation studies of (VDI 3633). The overall objective (step *target definition*) of the simulation study is to demonstrate the feasibility of a circular factory for batteries and to investigate the relevance of each individual ReX station. In the following section 3.1, first, the general concept of the disassembling and recycling processes concerning LIBs and their interfaces to remanufacturing are described (step *system analysis*). In the

ReX process chains are individual for each end-of-life (EOL) battery and are chosen based on characteristics like battery type, SoH, and size. Assigning a ReX process chain variant to an incoming EOL battery takes place at the very beginning of the ReX process chain at the appraisal station and can be readjusted after each disassembling.

3.2 Modelling of modular ReX station

To address dynamic material flows and varying ReX station behaviours in simulation, a new modelling approach for generic material-disaggregation stations is introduced. Each modular ReX station must receive information about which products or goods represented as moving units (MUs) it shall create. In addition, information about qualities, quantities, and destinations of the resulting output MUs is required. All information should be individual for each kind of product or good that can enter the modular ReX station. The required information is provided by the central *Process_table* matrix. A schematic representation is shown in Figure 2 on the right, with the modular ReX station representing *Diss 2* and the incoming MU being a battery module. This information determines the column and row index of the matrix, returning a unique *config_table* that specifies the behaviour of the modular ReX station. All classes of MUs contain a parameter describing their cell type, which leads via the index of *config_table* to information about the quality of the process. Some MUs can have optional parameters, like in this case the number of cells *No_cells*. If a parameter is listed in the column *Multiplier*, the number of generated outputs MUs is multiplied by this parameter. The *isEndproduct* parameter defines whether the output MU will pass through further modular ReX stations or its ReX process chain is complete and it enters linear production. The structure of a modular ReX station is shown on the left in Figure 2. MUs enter and leave the ReX station via airlocks, enabling process-specific atmospheres, i.e. oxygen exclusion. After entering through the airlock, the MU occupies the first station (deportioner). Here, the processing time and required energy are simulated. Then the product is divided and moved to the portioning stations of the ReX station. The connections between the stations are configured in such a way that the quantities arriving at each exiting station correspond to the defined quantities and are adjusted to the qualities from the *config_table*.

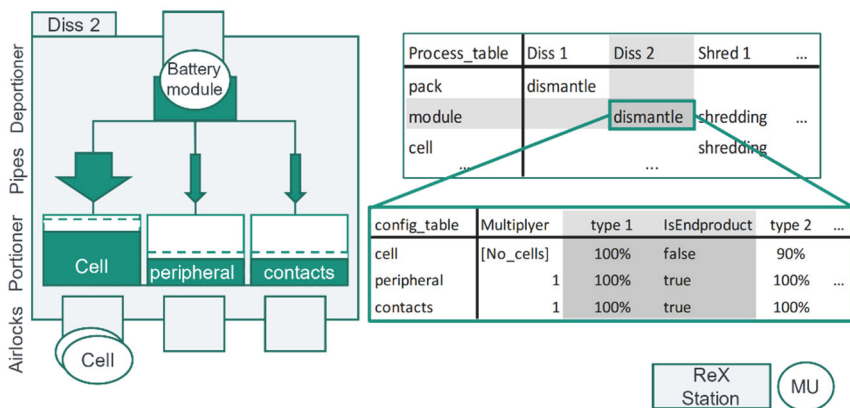


Figure 2: Concept of modular ReX station (left) and *Process_table* with *Config_table* (right). Example for battery module (MU) entering station *Diss 2*

The quantity of generated output MUs leaving a modular station is equivalent to the number of components of the input MU. For example, is a battery module disassembled, as many cells as this module contains are generated. This may lead to a cluttered situation at the exit airlock of the stations. To prevent traffic jams, the MUs are stored and transported between ReX stations in magazines, which have a capacity between 5 and 100 units, depending on the type of MUs. Furthermore, MUs that represent packs, modules, or cells will only share a magazine, if they share the same decision about reusing, remanufacturing, or further disassembly.

3.3 Material flow control

Each output MU of a modular station is transferred to an exit buffer and has four successor options (see Figure 1). The next target station of the exiting MU is defined by the method *material flow control*. If it is an endproduct, (1) the MU will be stored as recycled material in a storage. If *isEndproduct* is false, the exiting MU will be (2) transferred to the next designated modular station. Otherwise the output MUs will not be disassembled further but, (3) be transferred to a buffer for ReUse if the MU characteristics, such as product and SoH, allow reuse, or (4) be transferred to the appropriate manufacturing station.

Pseudocode for material flow control

```

if MU not isEndproduct
    get successor from process_chain
    move to successor
elseif MU meets criteria for reuse
    move to it's buffer for reuse
elseif MU meets criteria for remanufacturing
    move to it's buffer remanufacturing
    get remanufacturing station with shortest queue
    move to remanufacturing station
else
    move MU to it's buffer for recycling
  
```

Parts leaving the overall ReX process via (3) are first stored in a buffer between the ReX area and the linear manufacturing area. When one ReX part is entering the linear production line, this part is subtracted from the original production plan for linear production. Then, to determine the station in the manufacturing step where the ReX parts enter, the station of this manufacturing steps with the lowest utilization is selected. The magazine is then transported from the buffer to this station and the parts are from now on treated as new ones. This way, parts entering the linear manufacturing have a direct influence on the behavior of both systems. This allows detailed evaluations of the individual processes and raw material consumption can be determined. These analyses can help to improve the planning and control of integrated remanufacturing factories.

4 Use Case

The developed approach is applied to a use case based on the AgiloBat production system for the agile production of battery cells (Ruhland et al., 2022; Andersen et al., 2022). The production system uses micro environments to achieve a high adaptability. A DES model of this production system in the software Plant Simulation from

Siemens was created and described by Overbeck et al. (2022). This simulation model covers already various technology alternatives to produce battery cells and can model different future scenarios of market and technological development. For the current paper, circular processes are added, partly based on the solutions developed in the research project DeMoBat (Gerlitz et al., 2019). In section 4.1 the final model is presented, followed in section 4.2 by the *implementation* of recycling processes. Finally, the *experiments and analysis* are demonstrated in section 4.3.

4.1 The integrated simulation model

The existing simulation model of agile cell production is extended by a source of used battery packs, disassembly, and recycling stations, and follows the design presented in Chapter 3. A cutout of the resulting model is shown in Figure 3, which includes the ReX area (A), linear manufacturing (B), buffers for ReX parts capable for reuse (C), buffers for ReX parts that will be re-introduced into manufacturing (D), and buffers for finished recycled goods (E). The ReX production consists of an inspection for incoming batteries (1), battery cell deactivation (4), and disassembly and recycling processes that are represented by modular ReX stations which are as follows:

- disassembling stations for packs (2), modules (3), cells (5), cell stacks (6), and electrodes (7)
- mechanical processing stations: recovery electrolyte (8) and shredder (10)
- pyrolysis station (9), pyrometallurgy station (11) and hydrometallurgy station (12)

The image section of the linear production in Figure 3 shows the manufacturing of electrodes and contains stations for mixing of slurry (13), coating of the electrodes in sheet-to-sheet (14) and coil-to-coil (15) processes, calendaring (16), slitting (17), cutting (18), and stacking (19). The shown detail is limited to the processes of electrode manufacturing but the complete simulation model also includes cell assembly and cell activation of (re)manufactured cells.

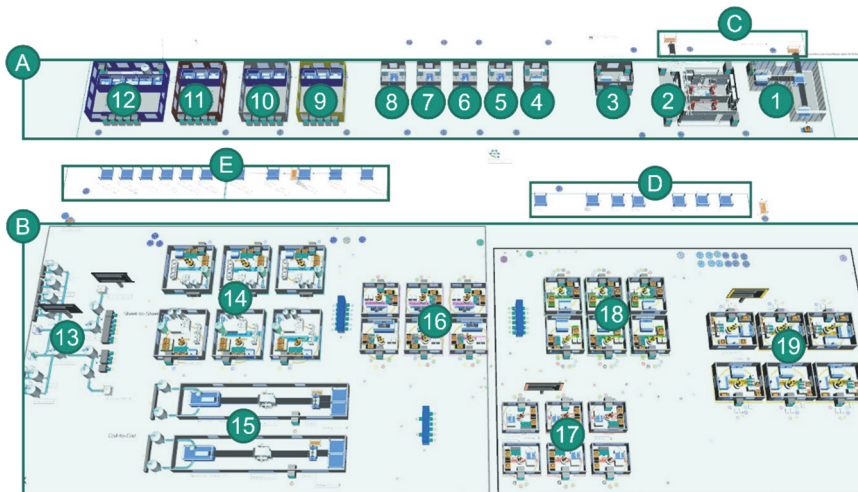


Figure 3: Cutout of electrode manufacturing and ReX area in Plant Simulation model

4.2 Configuration of ReX Stations

All possible disassembly degrees of batteries and further material recovery techniques for LIBs shall be investigated with the help of the simulation model. These feasible combinations of disassembling and recycling steps are recorded as process chain variants in accordance with Doose et al. (2021).

The chemical-technical behaviour of the process chains is embedded in the form of a matrix (Figure 5). It defines for each modular station and possible input MUs the output MUs with corresponding quantities, qualities, and information about further decomposition. A challenge is that the same modular station reacts differently to the same inputs that have undergone different previous treatments. For example, the hydrometallurgy station reacts differently to black mass that has been previously pyrolyzed than to untreated black mass. To account for the dependency on preceding process steps some process steps generate their own MUs with a corresponding identification. For example, black mass is represented by the MU *Black_Mass*, and after pyrolysis the corresponding MU is *Black_Mass_pyro*.

string 0	table 1	table 2	table 3	table 4	table 5	table 6	table 7
string BE Input	disassembly_p...	disassembly_m...	disassembly_cell	disassembly_ce...	disassembly_el...	mechanical_pr...	...
1 .UserObjects.MU_pack	pack_disassem...					shredding_pack	
2 .UserObjects.MU_module		module_disass...				shredding_mo...	
3 .UserObjects.MU_cell			cell_disassembly			shredding_cell	
4 .UserObjects.MU_cell_stack				cell_stack_disas...		shredding_cell_...	
5 .UserObjects.MU_anode					anode_disasse...		
6 .UserObjects.MU_kathode					kathode_disass...		
7 .UserObjects.MU_black_mass							
8 .UserObjects.M...							
9 ...							

string 1	list 2	real 3	boolean 4	real 5	boolean 6	real 7
string BE_Pfad	multiplier	NMC811	NMC811_endproduct	NMC622	NMC62...	...
1 .UserObjects.MU_cell_stack		1.00	false	1.00	false	
2 .UserObjects.MU_cell_pouch_foil		1.00	true	1.00	true	
3 .UserObjects.MU_electrolyte	elektrolyte_per_cell	1.00	true	1.00	true	
4 .UserObjects.MU_cell_connectors		1.00	true	1.00	true	

Figure 4: Process table with information for ReX stations

4.3 Experiments

One exemplary experiment to gain deeper insights into the functionality of the circular factory, which is presented in the following, aims to investigate the effect of different battery characteristics on the utilisation of the individual ReX stations and production stations. The analysis includes throughput and occupancy times of the processing stations. Other analyses, which are not presented here, looked at buffer occupancy, AGV travel times, and the consideration of recycled material quantities.

Input for the simulation is a production plan and a delivery list of EOL batteries. The production plan contains 2610 battery cells of the type NMC 811, representing the estimated production capacity of the modeled manufacturing system over a 30-day period. The delivery list consists of 200 EOL battery packs. The used batteries are fed into the system at 24-hour intervals in batch sizes of 10. The SoH of each incoming LIB is normally distributed with the mean value determined by the scenario and a standard deviation of 5%. The expected mean SoH for the three scenarios is chosen as 0.85, 0.75, and 0.7, respectively, based on automotive industry standards which consider a battery reached EOL when it has lost 20% to 30% of its original capacity

(Barco et al., 2020). Returned battery packs are suitable for reuse, if their SoH is greater than 0.85. If it is lower, it is sent to the pack disassembly station. The modules obtained from dismantling have a SoH randomly drawn from a normal distribution with a 5% standard deviation, using the SoH of the originating pack as the mean value. Modules with SoH above 80% are reused, those between 70% and 80% are fed into the manufacturing system, and those below 70% are further disassembled. The cells' SoH fluctuates by 20% around the SoH of their originating disassembled module. Cells with a SoH higher than 80 % are remanufactured, cells with a lower SoH are recycled. Simulation runs were conducted for each scenario with a 30-day simulation time, and the material flows are displayed in Table 1.

Table 1: Material flow (throughput) of EOL components in the circular factory

Mean SoH	Dismantled packs	Reused modules	Remanuf. modules	Dismantled modules	Remanuf. cells	Recycled cells
0,85	107	192	168	6.7	20	120
0,75	196	102	360	84.4	40	220
0,70	200	22	216	108	80	560

Figure 6 demonstrates how material flows affect the utilization of individual stations. The graph shows that components leaving the system for reuse do not impact following ReX stations or the linear production area, while redirecting used components increases the load on ReX processes before the reintegration point and linear production processes after the reintegration point, leading to underutilization of upstream resources like coating and drying (14). Notably, recycling stations experience high utilization in low SoH scenarios but low to minimal utilization in medium to high SoH scenarios, resulting in less, moderate, and high influence of linear manufacturing for low, medium, and high SoH scenarios respectively.

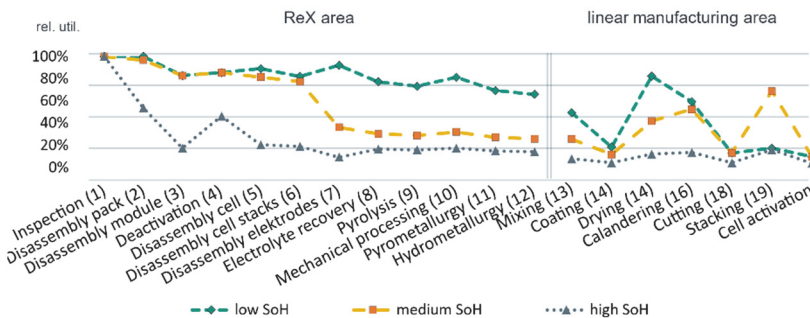


Figure 5: Relative utilization of ReX stations (left) and linear manufacturing stations (right) for scenarios of LIB with low SoH, medium SoH and high SoH

From an environmental and economic standpoint, maximizing the reintegration of disassembled components into the manufacturing process or declaring functional

components suitable for reuse is desirable. However, certain components will still require recycling and manufacturing. Proper sizing of ReX and manufacturing stations is critical and simulating expected EOL battery returns can help design optimal facilities for this task. The presented experiment tackles the complex production planning and control challenge of line balancing in a circular plant. Following Rabe et al. (2008), the model verification method “review” was performed for the model with experts and the criteria *suitability*, *comprehensibility* and *feasibility* applied.

5 Summary and outlook

Preliminary research on the use of DES in remanufacturing of LIBs exists but not on an integrated consideration at the factory level. This research gap was tackled by the presented approach, which allows the integrated modelling of processes for ReX as well as manufacturing in one simulation model and at the same time considers the particularities regarding the domain of LIBs. A special challenge in modelling ReX processes for LIBs is the variety of possible process chains with different effects on the recovered components or materials. In response to the challenge of multiple process variations and the multitude of material flow decisions required, a design based on modular stations capable of representing a variety of process outcomes depending on its input materials was introduced. In addition, the approach includes an integration of ReX parts and materials into a modular production system for batteries, which allows a detailed analysis of individual machine utilization and line balancing. The presented approach was implemented in Plant Simulation for the AgiloBat agile battery production system and possible disassembly and recycling processes were implemented. It was illustrated to what extent technological and economic analyses can be performed for optimal system design and control. It was shown how the required capacity of process steps depends on the SoH of the returning batteries. In future research, the model could be extended to simulate energy consumption and the environmental impact of each process for a multicriteria analysis. Furthermore, the model can be extended by integrating scrap material from the cell production due to start-up problems or defective products directly into the ReX system.

Acknowledgment

The authors thank the German Ministry of Education and Research (BMBF) for funding the project *AgiloBat2* (03XP0369A) as well as the Ministry of Economics, Labor, and Tourism of Baden-Württemberg for funding the project *BatterieZellFab* (WM34-42-57/30) and the project *BatteReFAB* (WM34-42-57/25).

References

- Alfaro-Algaba, M.; Ramirez, F.J.: Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling* 154 (2020)
- Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Brunoe, T.D. et al.: *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing 2022.
- Braco, E.; San Martín, I.; Berrueta, A. et al.: Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage* 32 (2020).

- Cerdas, F.; Kurle, D.; Andrew, S. et al.: Defining Circulation Factories – A Pathway towards Factories of the Future. *Procedia CIRP* 29 (2015), pp. 627–632.
- Deveci, M.; Simic, V.; Torkayesh, A.E.: Remanufacturing facility location for automotive Lithium-ion batteries: An integrated neutrosophic decision-making model. *Journal of Cleaner Production* 317 (2021).
- Doose, S.; Mayer, J.K.; Michalowski, P. et al.: Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. *Metals* 11 (2021) 2.
- Eddy, J.; Pfeiffer, A.; van de Staaij, J.: Recharging economies: The EV-battery manufacturing outlook for Europe, McKinsey, 2019.
- Fleischer, J.; Gerlitz, E.; Rieß, S. et al.: Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles. *Procedia CIRP* 98 (2021), pp. 577–582.
- Gerlitz, E.; Kaiser, J.-P.; Hofmann, J., 2019: DeMoBat, KIT Karlsruhe. <https://www.wbk.kit.edu/intern/DeMoBat/index.php>, Accessed 26.04.2023.
- Huster, S.; Glöser-Chahoud, S.; Rosenberg, S. et al.: A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. *Journal of Cleaner Production* 363 (2022).
- Kampker, A.; Wessel, S.; Fiedler, F. et al.: Battery pack remanufacturing process up to cell level with sorting and repurposing of battery cells. *Journal of Remanufacturing* 11 (2021), pp. 1–23.
- Overbeck, L.; Voigtländer, S.; Lanza, G.: Optimal line configurations for agile production systems for battery cell manufacturing. In: 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Online, 13.-15.07.2022 (without page numbers).
- Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Ruhland, J.; Storz, T.; Kößler, F. et al.: Development of a Parallel Product-Production Co-design for an Agile Battery Cell Production System. In: Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Brunoe, T.Ditlev et al. (Eds.): *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing; Springer 2022, pp. 96–104.
- Standridge, C.R.; Hasan, M.M.: Post-vehicle-application lithium-ion battery remanufacturing, repurposing and recycling capacity: Modeling and analysis. *Journal of Industrial Engineering and Management* 8 (2015) 3, pp. 823–839.
- VDI 3633: *Simulation of systems in materials handling, logistics and production - Fundamentals*, 2014.
- Ventura Silva, G.; Thomitzek, M.; Abraham, T. et al.: Simulation-based Assessment of Energy Demand and Costs Associated with Production Scrap in the Battery Production. *SNE Simulation Notes Europe* 32 (2022) 3, pp. 143–150.
- Wakiru, J.; Pintelon, L.; Muchiri, P.N. et al.: Integrated remanufacturing, maintenance and spares policies towards life extension of a multi-component system. *Reliability Engineering & System Safety* 215 (2021).
- Wurster, M.; Michel, M.; May, M.C. et al.: Modelling and condition-based control of a flexible and hybrid disassembly system with manual and autonomous workstations using reinforcement learning. *Journal of Intelligent Manufacturing* 33 (2022) 2, pp. 575–591.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulative Bestimmung der Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten unter Berücksichtigung von Kundenpräferenzen

Simulative Determination of Demand for Remanufactured Products under Consideration of Customer Preferences

Sandra Huster, Thomas Unterladstätter, Sonja Rosenberg, Andreas Rudi, Frank Schultmann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany),
sandra.huster@kit.edu, thomas.unterladstaetter@student.kit.edu,
sonja.rosenberg@kit.edu, andreas.rudi@kit.edu, frank.schultmann@kit.edu

Abstract: The remanufacturing market as a whole is growing. However, it is unclear how it will develop for single products. We propose a simulation model to simultaneously estimate the demand for remanufactured products and the supply of used products for remanufacturing. The estimation is based on the material flow of a 2-component product with distributed component lifetimes, the characteristics of the remanufactured product, and potential customers' preferences. The model, which combines discrete event and agent-based simulation, is applied to the use case of electric vehicles and their traction batteries. After battery failure, the car owners can decide whether to buy a new or a remanufactured battery or discard the vehicle and buy a new one. The model's features are demonstrated by varying the characteristics of remanufactured batteries and showing the effects on customer choices.

1 Einleitung

Der Markt für wiederaufgearbeitete Produkte wächst vor dem Hintergrund der effizienten Ressourcennutzung (Parker et al., 2015). Eine Herausforderung ist die Abschätzung der Menge an Altprodukten zur Wiederaufarbeitung (Marx-Gómez et al., 2002). Insbesondere für neue Produkte, wie die Batteriesysteme von Elektrofahrzeugen, ist dies aufgrund fehlender Erfahrungswerte und einer unsicheren Marktentwicklung relevant (Liang et al., 2014). Doch nicht nur das Angebot an aufzuarbeitenden Produkten ist mit Unsicherheiten behaftet, auch die Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten ist ungewiss. Damit Nachfrage entsteht, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Eine Grundvoraussetzung ist, dass ein Bauteil ausfällt, welches ersetzt werden soll, da aufgearbeitete Komponenten in der Regel als Ersatzteile verwendet werden. Allerdings wird nicht jedes defekte Bauteil ersetzt, und statt eines aufgearbeiteten Ersatzteils kann auch ein neues Ersatzteil verwendet

werden. Eine zweite Voraussetzung für das Entstehen von Nachfrage ist, dass Kunden aufgearbeitete Ersatzteile akzeptieren (Singhal et al., 2019).

In der Literatur wird die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten bisher nachrangig betrachtet, einzelne Ansätze sind aber zu finden. So schätzen zum Beispiel Matsumoto und Komatsu (2015) und Mishra et al. (2013) die Nachfrage mithilfe der Zeitreihenanalyse. Manche Autoren, wie Ardi und Aditiya (2019) und Chou et al. (2020), sehen wiederaufgearbeitete Produkte als Substitute für Neuware, so dass die Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten eine Teilmenge der gesamten Produktnachfrage ist. Andere Autoren, wie Jaber und El Saadany (2009), betrachten die Märkte für neue und aufgearbeitete Produkte als getrennte Märkte, für die eine separate Betrachtung notwendig ist. Goltsov et al. (2019) stellen nach einer Literaturanalyse fest, dass in der Regel davon ausgegangen wird, dass die Nachfrage bekannt ist und nicht prognostiziert werden muss. Dieser Annahme widersprechen sie aber und betonen die Wichtigkeit von Nachfrageprognosen, die gleichberechtigt neben Angebotsprognosen stehen sollten. Ganeshan (2020) erklärt Nachfrageprognosen im Aufarbeitungskontext ebenfalls zu einem bisher zu wenig erforschten Gebiet. Als eine der Schwierigkeiten führt er neben weiteren Unsicherheiten auf, dass die Kundenwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte unbekannt ist. Auch Akano et al. (2021) betonen die Wichtigkeit von Kundeninteressen bei Aufarbeitungsentscheidungen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Prognosen der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten Unsicherheiten unterliegen. Diese umfassen auch eine mögliche Ablehnung von aufgearbeiteten Produkten durch Kunden und sind noch unzureichend untersucht.

Eine Möglichkeit, Unsicherheit zu begegnen, ist die Verwendung von Simulationen; diese können auch komplexe Systeme und unterschiedliche Arten von Unsicherheiten abbilden (Mula et al., 2006) und erlauben die Betrachtung verschiedener Szenarien. In diesem Beitrag wird deshalb der Ansatz der Simulation gewählt, um gleichzeitig die Nachfrage nach aufgearbeiteten Ersatzteilen und das Angebot an aufarbeitungsfähigen Produkten zu schätzen. Der Ansatz berücksichtigt dabei sowohl die relevanten Materialflüsse als auch Produkteigenschaften und die Präferenzen von Endkunden. Der Materialfluss wird ereignisdiskret modelliert, was in einer Grundversion bereits veröffentlicht wurde (Huster et al., 2022). Kundenpräferenzen und Produkteigenschaften werden mithilfe der agentenbasierten Simulation in das Grundmodell integriert. Die Innovation des Ansatzes liegt darin, dass „harte“, zahlenbasierte Faktoren, wie Produktverkäufe und die Lebenserwartung von Produkten, mit weichen Faktoren, wie dem menschlichen Verhalten, kombiniert werden, um Prognosen im Kontext von geschlossenen Wertschöpfungsketten zu erstellen. Somit wird die Interdisziplinarität des Problems berücksichtigt und sozialwissenschaftliche Ansätze werden mit der simulationsbasierten Produktflussanalyse verknüpft.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 wird das Simulationsmodell vorgestellt. Es folgt in Kapitel 3 die Einführung in eine Case Study, nämlich die Anwendung des Modells auf den Fall der Elektrofahrzeuge. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Fallstudie vorgestellt (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

2 Simulativer Lösungsansatz

Das Simulationsmodell zur simultanen Prognose von Angebot und Nachfrage nach aufgearbeiteten Teilen betrachtet ein Produkt, das aus einer Haupt- (HK) und einer Nebenkomponente (NK) besteht. Wenn die NK das Ende ihrer Nutzungsphase erreicht hat, kann sie potentiell durch ein aufgearbeitetes Produkt ersetzt werden. Die Modelllogik ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

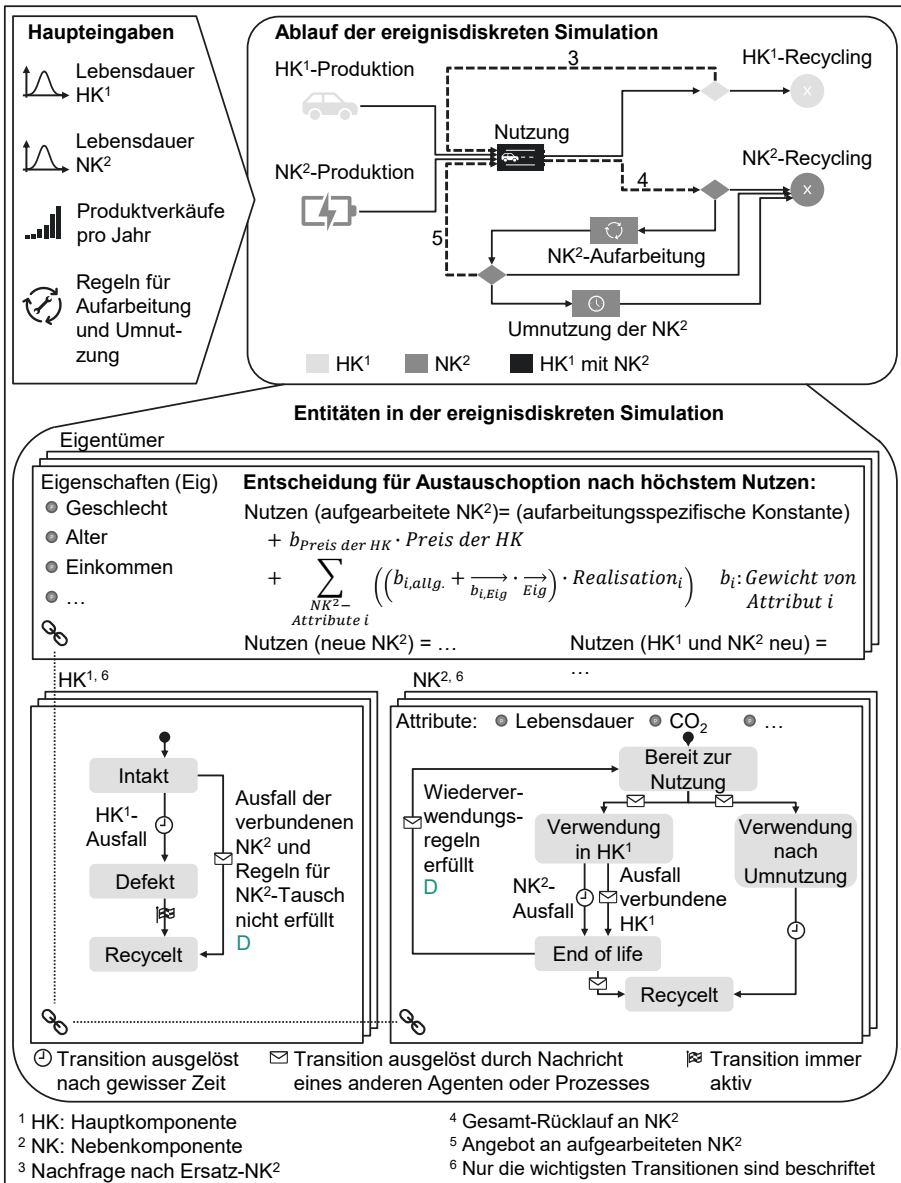


Abbildung 1: Modelllogik (in Teilen basierend auf Huster et al. (2022))

In einem ersten Teil des Modells wird der Produktfluss der HK und der NK abgebildet. Dieser Teil des Modells ist ausführlich in Huster et al. (2022) dargestellt und wird hier nur kurz erläutert: Der Produktfluss beginnt damit, dass gemäß prognostizierten Produktverkäufen neue Produkte bestehend aus einer HK und einer NK in das System eingebracht werden. Dies erlaubt Märkte mit sich ändernden Marktvolumen zu modellieren. Die HKs und NKs haben eigene Lebensdauerverteilungen und können somit unabhängig voneinander ausfallen. Wenn eine der Komponenten ausfällt, verlassen beide die Nutzungsphase. Danach kann unabhängig von der jeweils anderen Komponente bestimmt werden, welcher Nutzung oder Verwertung die HK und die NK zugeführt werden. Verschiedene Verwertungsalternativen stehen zur Verfügung. Ob HKs und NKs direkt recycelt werden oder ein Ersatzteil erhalten bzw. zu einem Ersatzteil aufgearbeitet werden, hängt unter anderem von Regeln ab, die vor dem Simulationsbeginn festgelegt werden. Diese Regeln gelten beispielsweise hinsichtlich Altersgrenzen, bis zu denen eine HK ein Ersatzteil erhält oder bis zu denen eine HK aufgearbeitet wird. Außerdem können sich die Eigentümer für oder gegen ein Ersatzteil (neu oder aufgearbeitet) entscheiden. Diese Kundenentscheidung stellt den zweiten Teil des Simulationsmodells dar.

Jedes Produkt (HK mit NK) wird, sobald es das System betritt, mit einem Eigentümer verknüpft. Fällt nun eine NK aus, muss der Eigentümer entscheiden, ob er eine neue Ersatz-NK oder eine aufgearbeitete Ersatz-NK erwerben möchte, oder ob er ein komplett neues Produkt (HK mit NK) erwirbt. Die Entscheidung hängt von den Eigenschaften der HK, der NK und des Eigentümers ab. Als entscheidungsrelevante Eigenschaft der HK wird der Neupreis festgelegt, der folglich bei jeder HK-Entität im Simulationsmodell hinterlegt sein muss. Die relevanten Eigenschaften der NK sind der Preis, die Haltbarkeit (Lebensdauer) und die Umweltfreundlichkeit. Um neue und aufgearbeitete NKs gut vergleichen zu können, werden die Attribute im Modell übersetzt zu „Preiseinsparungen im Vergleich zu einer neuen NK“, „Lebensdauereinbußen im Vergleich zu einer neuen NK“ und „CO₂-Äquivalent-Einsparungen im Vergleich zu einer neuen NK“. Eigentümer werden über die Eigenschaften Geschlecht, Alter, Einkommen, Bildungsgrad und Wohnort definiert.

Muss nun ein Eigentümer mit defekter NK eine Entscheidung treffen, wird im Modell der Nutzen jeder seiner Optionen berechnet. Die Berechnung setzt sich additiv aus folgenden Bestandteilen zusammen (siehe Abbildung 1, „Entscheidung für Austauschoption nach höchstem Nutzen“):

1. Ein optionsspezifischer Wert bildet die grundsätzliche Präferenz für (I) eine Reparatur der HK mit neuen Ersatz-NKs („Ersatz neu“) oder mit (II) aufgearbeiteten Ersatz-NKs („Ersatz reman“) oder (III) den Neuerwerb des gesamten Produkts („none“) ab, unabhängig von den Eigenschaften der NKs. Der Wert schwankt in jeder Entscheidungssituation lediglich dadurch, dass er einer Verteilung folgt.
2. Der HK-Preis fließt positiv oder negativ in den Nutzen ein, indem er mit einem Gewicht multipliziert wird, das den Nutzen jeder Option erhöht oder verringert, je teurer die HK ist.
3. Die Eigenschaften der neuen und aufgearbeiteten NKs und der Eigentümer bilden die dritte und größte Komponente. Jedes Attribut, z. B. die Einsparungen im Vergleich zu einer neuen NK, wird mit einem Faktor gewichtet, der für die gesamte Population gilt, plus Zuschlags- oder

Minderungsfaktoren, die sich aus den Eigenschaften der Eigentümer ergeben.

Alle „Konstanten“ und Gewichte folgen Verteilungen, um dem Zufall der Entscheidung und der Heterogenität der Population Rechnung zu tragen. Die Bestimmung der Verteilungsparameter erfolgt exogen, z. B. durch ein diskretes Entscheidungsexperiment, und wird dem Modell als Input übergeben.

Die Entscheidung fällt auf die Option mit dem höchsten Nutzen. Sie beeinflusst die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten und, sofern das Angebot an die Nachfrage angepasst wird, auch den Verwertungsweg von NKs am Nutzungsende.

3 Fallstudie Traktionsbatterien

Das in Kapitel 2 vorgestellte Simulationsmodell wird zu Demonstrationszwecken auf Elektrofahrzeuge in Deutschland angewendet. Das Produkt eignet sich deshalb, weil es erst vor wenigen Jahren in heutiger Form auf den Markt gekommen ist, seit dem einen steigenden Marktanteil erreicht, und erwartet wird, dass sich dieses Marktwachstum fortsetzt (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2022; Deloitte, 2020). Damit kann die Stärke des Modells, zeitliche Verzögerungen zwischen Angebot und Nachfrage darzustellen, genutzt werden. Die Nebenkomponekte ist in dem Fall die Traktionsbatterie, das restliche Fahrzeug ohne Batterie die Hauptkomponente. Wie in Kapitel 2 beschrieben, werden Elektrofahrzeuge gemäß einer Neuzulassungsprognose in das System eingebracht und direkt mit einem Eigentümer verknüpft. Erreicht das Fahrzeug das Ende seiner Lebensdauer, wird es dem Recycling zugeführt und die Batterie wird separat und unabhängig vom Fahrzeug recycelt oder aufgearbeitet. Fällt andersherum die Batterie vor dem Fahrzeug aus, muss der Eigentümer über einen Batteriewechsel mit einer neuen oder aufgearbeiteten Batterie oder die Aufgabe des Fahrzeugs entscheiden. Dies gilt nur, sofern das Fahrzeug älter als acht Jahre ist, da ansonsten die Garantie greift, die in der Regel 8 Jahre oder 160.000 km beträgt (ADAC, 2021), und der Hersteller die Batterie ersetzt, annahmegemäß durch eine Neubatterie.

Als Betrachtungszeitraum wird 2015-2050 gewählt. Der Start in der Vergangenheit erlaubt es, das System initial und realistisch zu befüllen. Von 2015-2021 werden die tatsächlichen Neuzulassungszahlen in Deutschland als Input für das System verwendet (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2022). Von 2022-2040 dient die Prognose von Deloitte (2020) als Basis. Von 2041 bis 2050 wird die Anzahl an Neuzulassungen konstant auf den Wert von 2040 festgelegt. Die technologische Entwicklung in diesem Zeitraum wird berücksichtigt, indem alle fünf Jahre eine neue Fahrzeug- und Batteriegeneration angenommen wird, die jeweils ein Jahr Überschneidung zu der vorherigen und der nachfolgenden Generation aufweist. Zwischen den Generationen besteht keine Kompatibilität, so dass Fahrzeuge der Generation A auch nur Ersatzbatterien der Generation A erhalten können. Es werden drei Fahrzeuggrößen betrachtet (groß: 44 %, mittel: 16 %, klein: 40 %, in Anlehnung an Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2022)). Die mittlere, weibullverteilte Fahrzeuglebensdauer beträgt 14 Jahre (Oguchi und Fuse, 2015), auf die der Batterien wird später eingegangen.

Die Festlegung der Eigentümereigenschaften ist angelehnt an die Verbrauchertypen des Diffusionsprozesses nach Rogers (2003), nämlich die Innovatoren, die frühen

Anwender, die frühe Mehrheit, die späte Mehrheit und die Nachzügler. Kunden der ersten Jahre sind Innovatoren, es folgen die frühen Anwender usw. Die Eigenschaften werden den Verbrauchertypen zugeordnet. Zum Beispiel sind Elektrofahrzeugkäufer der ersten Stunde (Innovatoren) vorrangig männlich (Frenzel et al., 2015) und der Frauenanteil steigt bei späteren Verbrauchertypen. Hinsichtlich der Altersverteilung unterscheiden sich die Typen laut Rogers (2003) hingegen nicht, weshalb hier mithilfe einer Weibull-Verteilung näherungsweise die Altersverteilung in Deutschland ab 18 Jahren für alle Verbrauchertypen gespiegelt wird.

Ein weiterer Input in das Modell sind die Gewichtungen, welche die Batterieeigenschaften bei der Nutzenberechnung erhalten. Hierfür wurde ein diskretes Auswahlexperiment durchgeführt mit 914 vollständigen Antworten. In diesem Auswahlexperiment wurden die Befragten 14 Mal vor die Wahl gestellt, welche Option sie wählen würden, wenn nach Ablauf der Batteriegarantie die Batterie nicht mehr die Leistungsanforderungen erfüllt: Entscheiden sie sich für eine neue Ersatzbatterie, für eine aufgearbeitete Ersatzbatterie oder für die Aufgabe und den Ersatz des Fahrzeugs? Die ersten beiden Optionen unterschieden sich hinsichtlich der Eigenschaften, die im Simulationsmodell die NK unterscheiden. Außerdem war bei allen Optionen der Fahrzeugneupreis angegeben. Die Auswertung erfolgte mittels hierarchischer Bayes-Methode unter Verwendung eines Mixed Logit-Modells. Für Grundlagen zur Auswertung von Auswahlexperimenten sei auf Train (2009) verwiesen.

Um das Angebot und die Nachfrage unter verschiedenen Bedingungen zu vergleichen, wurden verschiedene Spezifikationen für aufgearbeitete Batterien angenommen (siehe Tabelle 1). Neue Batterien haben annahmegemäß eine weibullverteilte Lebensdauer von 10 Jahren (Ai et al., 2019). Für aufgearbeitete Batterien wird angenommen, im Standardfall eine vier Jahre kürzere Lebenserwartung zu haben, 40 % günstiger zu sein und einen um 20 % verringerten Treibhausgasausstoß bei der Produktion im Vergleich zu einer Neubatterie zu verursachen. Zusätzlich werden jeweils Fälle mit 20 Prozentpunkten mehr und weniger Einsparungen hinsichtlich Preis und CO₂ betrachtet, und Fälle mit 2 Jahren mehr und weniger Lebensdauereinbußen.

Tabelle 1: Untersuchte Szenarien

Name	Batteriekosten- ersparnis	Lebensdauer- verkürzung	CO ₂ -Einsparung
Standard	40 %	4 Jahre	20 %
BP-20	20 %	4 Jahre	20 %
BP-60	60 %	4 Jahre	20 %
LD-2	40 %	2 Jahre	20 %
LD-6	40 %	6 Jahre	20 %
CO ₂ -0	40 %	4 Jahre	0 %
CO ₂ -40	40 %	4 Jahre	40 %

4 Ergebnis

Wie Abbildung 2 a) zeigt, entscheidet sich in allen betrachteten Szenarien die Mehrheit der Fahrzeugeigentümer im Fall eines Batteriedefekts nach Garantieende für den Austausch der Batterie durch eine aufgearbeitete Ersatzbatterie. Im Standard-Fall fällt die Wahl in ca. 57 % der Entscheidungssituationen auf die aufgearbeitete Batterie. Ausgehend von diesem Standardfall zeigt sich, dass eine Variation der erwarteten Lebensdauer die höchsten Auswirkungen auf die Anzahl der Entscheidungen für die Option „Ersatz reman“ hat. Wird statt einer Lebensdauer von sechs Jahren (Standardfall: $10-4=6$) eine Lebensdauer von nur vier Jahren (LD-6) erwartet, sinkt die Wahlhäufigkeit um 27 %. Steigt die Lebensdauererwartung hingegen auf acht Jahre, steigt sie um 35 %. Steigt oder sinkt die Kostenersparnis für den Batteriekauf um 20 Prozentpunkte (BP-60, BP-20), beeinflusst dies die Wahlhäufigkeit einer aufgearbeiteten Batterie ebenfalls stark (-25 % bzw. +35 %). Die Umweltfreundlichkeit von aufgearbeiteten Batterien hat einen deutlich geringeren Effekt. Wird ein Aufarbeitungsprozess gewählt, der gar kein CO₂ einspart (CO₂-0), verringert dies die Wahlhäufigkeit um nur 9 %. Wird die eingesparte CO₂-Menge verdoppelt von -20 % im Standardfall auf -40 % (CO₂-40), wird die Option 8 % häufiger gewählt. Die anderen beiden Optionen, eine neue Ersatzbatterie zu wählen oder das Fahrzeug abzustoßen, werden in allen Szenarien von einem Teil der Eigentümer im Modell gewählt. Es ist jedoch nicht einheitlich, welche der Optionen häufiger gewählt wird.

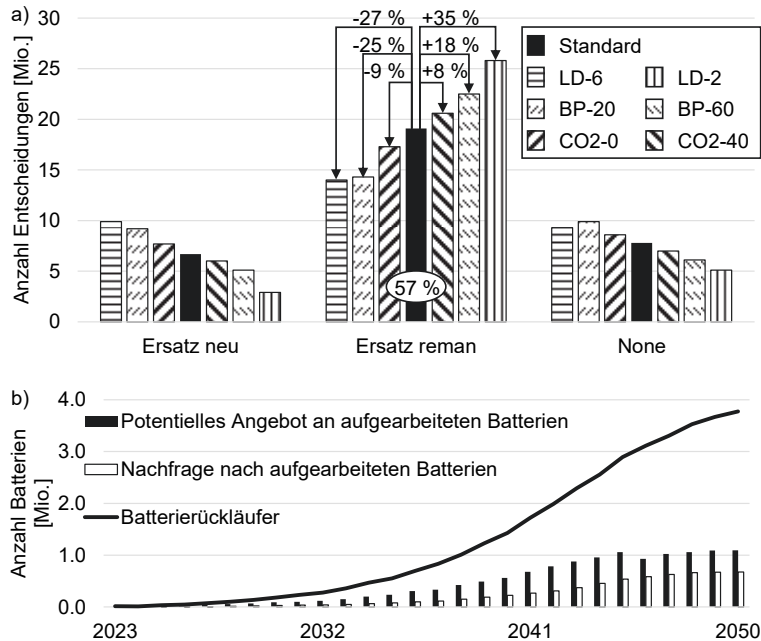


Abbildung 2: a) Anzahl der Entscheidungen der Fahrzeugeigentümer für eine der Austauschoptionen. b) Potentielles Angebot und Nachfrage nach aufgearbeiteten Batterien und die jährliche Gesamtzahl an Batterierückläufern im Standard-Szenario

In Abbildung 2 b) ist für das Standard-Szenario dargestellt, wie sich das potentielle Angebot von aufgearbeiteten Batterien und die Nachfrage danach im Zeitverlauf darstellen. Nachdem es in den ersten Jahren der Simulation zu einer minimalen Übernachtnachfrage kommt (in der Abbildung nicht sichtbar), ist ab 2025 unter den simulierten Bedingungen damit zu rechnen, dass die Nachfrage vollständig befriedigt werden kann. Im späteren Verlauf übersteigt das potentielle Angebot die Nachfrage deutlich. In dem Szenario mit der höchsten Nachfrage, LD-2, könnte ca. 3 % der Nachfrage nach aufgearbeiteten Batterien nicht bedient werden, in allen anderen Szenarien läge der Anteil bei unter einem Prozent.

5 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vorgestellten Simulationsmodell die Auswirkungen verschiedener Charakteristika aufgearbeiteter Batterien auf die Nachfrage geschätzt werden können und dabei gleichzeitig das erwartete Angebot abgebildet wird. Es ist jedoch zu beachten, dass zahlreiche Annahmen als Inputparameter in das Modell eingehen und die Aussagekraft auch von der Güte der Inputs abhängt. In vorherigen Untersuchungen konnte bereits der Einfluss verschiedener Annahmen hinsichtlich der Batterie- und Fahrzeuglebensdauern gezeigt werden (Huster et al., 2022). In der hier gezeigten Erweiterung um Kundenpräferenzen ist vor allem die Bestimmung der Nutzenwerte der einzelnen Optionen als kritischer Input zu nennen. Im vorliegenden Fall ist die Bestimmung dieser über diskrete Auswahlexperimente erfolgt mit einer Datenbasis von über 900 befragten Personen, von denen ca. die Hälfte ein Elektrofahrzeug besitzt und somit potentiell in die Situation kommen kann, eine Entscheidung über den Batterietausch treffen zu müssen. Die Art der Befragung mittels diskreten Auswahlexperimenten hat eine hohe externe Validität (Telser und Zweifel, 2007). Dennoch ist fraglich, ob die nicht systematisch ausgewählten Befragten einen Querschnitt der deutschen Bevölkerung darstellen. Dies könnte durch repräsentative Bevölkerungsbefragungen überprüft werden.

Es scheint plausibel, dass die erwartete Batteriebensdauer und die Kostenersparnis einer aufgearbeiteten Batterie die wichtigsten Kriterien sind, anhand derer Kunden sich für oder gegen eine aufgearbeitete Batterie entscheiden. Die Umweltfreundlichkeit spielt eine untergeordnete Rolle. Für Aufarbeiter heißt das, dass in der Entwicklung von Aufarbeitungsprozessen auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kosteneffizienz und Qualität geachtet werden muss und diese Kriterien auch bei potentiellen Kunden beworben werden sollten.

Das Simulationsmodell wurde auf den Anwendungsfall der Elektrofahrzeuge angewendet mit der Hauptkomponente „Fahrzeug ohne Batterie“ und der Nebenkompente „Batterie“, die bei einem Defekt ersetzt werden kann. Wie in Kapitel 3 kurz erläutert, eignet sich dieses Produkt, weil es einen wachsenden Markt darstellt. Für Produkte, in denen die Aufarbeitung bereits etabliert ist, ist die aufwändige Untersuchung des zukünftigen Marktes mittels des vorgestellten Simulationsmodells weniger geeignet. Bei etablierten Produkten kann auf Erfahrungswerte zurückgegriffen und Methoden der Zeitreihenanalyse können sowohl für die Schätzung des Angebots an aufarbeitbaren Teilen als auch für die Schätzung der Nachfrage verwendet werden. Der simulative Ansatz zeigt seine

Stärke, wenn verschiedene Zukunftsszenarien realistisch scheinen, z. B. hinsichtlich der Eigenschaften der aufgearbeiteten Produkte, der Käufer oder der Absatzzahlen.

Das Modell ermöglicht es, technologischen Fortschritt abzubilden, indem verschiedene Produktgenerationen zeitlich getrennt in das Modell eingespielt werden können, zwischen denen keine Kompatibilität besteht. Mögliche Erweiterungen wären, die Batterieeigenschaften generationsspezifisch anzupassen, etwa hinsichtlich der Lebensdauer oder des unter anderem rohstoffabhängigen Preises.

In der Realität beeinflussen mehr Akteure als die privaten Endkunden das Angebot und die Nachfrage nach aufgearbeiteten Teilen. Diese zu integrieren stellt eine mögliche Erweiterung des Modells dar. Auf den Automobilmarkt bezogen könnten zum Beispiel Geschäftskunden einbezogen oder der Gebrauchtwagenmarkt könnte modelliert werden. Auch der Einfluss weiterer Akteure, wie Autowerkstätten oder Originalteileherstellern, ist zu untersuchen und gegebenenfalls in das Modell einzupflegen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist im Rahmen des Projekts „Akteursbeziehungen in der kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfung von E-Fahrzeuggbatterien“ entstanden. Die Autoren danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg für die Förderung. Außerdem bedanken sich die Autoren bei Simon Hufnagel für die Durchführung der Befragung zur Wahl von aufgearbeiteten Antriebsbatterien.

Literatur

- ADAC, 2021: Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur. Unter Mitarbeit von Wolfgang Rudschies. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>, zuletzt geprüft am 14.02.2022.
- Ai, N.; Zheng, J.; Chen, W.-Q.: U.S. end-of-life electric vehicle batteries: Dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions. *Resources, Conservation and Recycling* 145 (2019), S. 208–219.
- Akano, D.I.; Ijomah, W.; Windmill, J.: Stakeholder considerations in remanufacturability decision-making: Findings from a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 298 (2021), S. 126709.
- Ardi, R.; Aditiya, G.P.: Remanufacturing Capacity Planning Strategy for Multigeneration Television Products in Closed Loop Supply Chain. In: *Proceedings of the 2019 5th International Conference on Industrial and Business Engineering*, Hong Kong, 27.09.2019-29.09.2019, 2019, S. 143–147.
- Chou, M.; Sim, C.K.; Yuan, X.M.: Policies for inventory models with product returns forecast from past demands and past sales. *Annals of Operations Research* 288 (2020) 1, S. 137–180.
- Deloitte: *Elektromobilität in Deutschland: Marktenwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen*, 2020.
- Frenzel, I.; Jarass, J.; Trommer, S.; Lenz, B.: *Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland: Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Berlin, 2015.

- Ganeshan, R.: Commentary: Why Is Forecasting for Remanufacturing Hard? *Forecasting: The International Journal of Applied Forecasting* (2020) 56, S. 18–19.
- Goltsos, T.E.; Syntetos, A.A.; van der Laan, E.: Forecasting for remanufacturing: The effects of serialization. *Journal of Operations Management* 65 (2019) 5, S. 447–467.
- Huster, S.; Glöser-Chahoud, S.; Rosenberg, S.; Schultmann, F.: A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. *Journal of Cleaner Production* 363 (2022), S. 132225.
- Jaber, M.Y.; El Saadany, A.M.: The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales. *International Journal of Production Economics* 120 (2009) 1, S. 115–124.
- Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ 14): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2021. Flensburg, 2022.
- Liang, X.; Jin, X.; Ni, J.: Forecasting product returns for remanufacturing systems. *Journal of Remanufacturing* 4 (2014) 1.
- Marx-Gómez, J.; Rautenstrauch, C.; Nürnberger, A.; Kruse, R.: Neuro-fuzzy approach to forecast returns of scrapped products to recycling and remanufacturing. *Knowledge-Based Systems* 15 (2002) 1-2, S. 119–128.
- Matsumoto, M.; Komatsu, S.: Demand forecasting for production planning in remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (2015) 1-4, S. 161–175.
- Mishra, P.; Yuan, X.-M.; Huang, G.; Xu, X.X.: Remanufacturing intermittent demand forecast: A critical assessment. In: 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Bangkok, Thailand, 10.12.2013 - 13.12.2013, 2013, S. 1012–1016.
- Mula, J.; Poler, R.; García-Sabater, J.P.; Lario, F.C.: Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics* 103 (2006) 1, S. 271–285.
- Oguchi, M.; Fuse, M.: Regional and longitudinal estimation of product lifespan distribution: a case study for automobiles and a simplified estimation method. *Environmental Science & Technology* 49 (2015) 3, S. 1738–1743.
- Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S.; Peck, D.: *Remanufacturing market study*, 2015.
- Rogers, E.M.: *Diffusion of innovations*. New York: Free Press 2003.
- Singhal, D.; Tripathy, S.; Jena, S.K.: Acceptance of remanufactured products in the circular economy: an empirical study in India. *Management Decision* 57 (2019) 4, S. 953–970.
- Telser, H.; Zweifel, P.: Validity of discrete-choice experiments evidence for health risk reduction. *Applied Economics* 39 (2007) 1, S. 69–78.
- Train, K.: *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge: Cambridge University Press 2009.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Der Hybride Digitale Zwilling: Eine praxistaugliche Verbindung von Simulation und operationellen Produktionssystemen

The Hybrid Digital Twin: A Practical Way to Connect Simulation with Operational Production Systems

Richard Scheer, Steffen Straßburger, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany),
richard.scheer@de.bosch.com, steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Marc Knapp, Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Germany),
marc.knapp@de.bosch.com

Abstract: Digital Twins are currently a topic of much discussion in academia. However, they have yet to be transferred to general industrial practice because there are still significant challenges concerning their implementation. This paper proposes the concept of the Hybrid Digital Twin to address these challenges. At first, it will elucidate the concept and introduce a real-world prototype of an operational production line. Afterwards, it will validate the prototypical implementation and demonstrate a detailed strategy to calibrate it. Then the paper presents potential strategies to use the Hybrid Digital Twin in a production environment. Finally, further developments and remaining issues are discussed.

1 Einführung

Produzierende Unternehmen stehen gegenwärtig vor einer Reihe struktureller Herausforderungen. Ressourcenknappheit und das Streben nach nachhaltiger Produktion erfordern innovative Strategien, um wettbewerbsfähig bleiben zu können. Die Methoden des Industrie 4.0 Paradigmas, insbesondere der Digitale Zwilling (DZ), bergen in diesem Kontext enormes Potenzial.

Der Begriff des DZ wird gegenwärtig sowohl in der akademischen Literatur als auch in der industriellen Praxis vermehrt eingesetzt. Kuehner et al. (2021) zeigten jedoch, dass es zum Zeitpunkt ihrer Analyse kein einheitliches Begriffsverständnis gab. Nachfolgend stellten sie jedoch auf Basis der untersuchten Literatur eine Begriffsdefinition auf, die auch in dieser Abhandlung gelten soll. Nach Kuehner et al. (2021) handelt es sich bei einem DZ um eine virtuelle Repräsentation eines physischen Gegenstücks. Der DZ bildet dabei die Grundlage für eine Simulation oder besteht selbst aus Simulationsmodellen. Zudem hat der DZ eine bidirektionale

Datenverbindung zwischen physischer und digitaler Komponente, welche über mehrere Lebensphasen des Systems bestehen kann.

Es existieren diverse wissenschaftliche Veröffentlichungen, die sich mit der spezifischen Implementierung von DZ im Produktionsumfeld befassen. Einige dieser Implementierungen fanden ausschließlich unter Laborbedingungen statt. So wurden bereits Produktionsanlagen wie z. B. eine Reibschweißanlage (Roy et al. 2020), ein Roboter (Matulis und Harvey 2021) oder ein Produktionssystem mit mehreren Elementen (Guo et al. 2020) unter Laborbedingungen mit einem DZ implementiert. Eine Übertragbarkeit auf reale Fertigungssysteme konnte jedoch nicht aufgezeigt werden. Es existieren auch bereits eine kleine Anzahl von Fallstudien, wie z. B. eine Satellitenfertigung (Zhuang et al. 2018), in welcher unter Realweltbedingungen Fertigungssysteme mit mehreren Elementen um einen DZ erweitert wurden. Hohe Implementierungsaufwände, wie bspw. dedizierte Vorrichtungen zur Datenaufnahme, zeigen jedoch, dass ihre Methodik nur bedingt praxistauglich ist.

Prinzipiell lässt sich feststellen, dass für die Implementierung eines DZ signifikante Hürden überwunden werden müssen. Kuchner et al. (2021) haben in einer weitläufigen Literaturanalyse in Form eines Meta-Reviews unter anderem folgende Implementierungshürden für den DZ identifiziert:

- Unzulänglichkeiten bei der Sammlung und Aufarbeitung von Daten
- Mangelnde Kenntnisse zur Modellierung und Simulation von DZ
- Fehlende Strategien, um einen DZ effizient und nutzbringend zu implementieren
- Mangelnde Konzeptstandardisierung

Es ist notwendig, die Überwindung dieser Hürden zu thematisieren, um ein praxistaugliches Implementierungskonzept für einen DZ zu erhalten. Bisherige Konzepte, die mit mindestens einer Fallstudie untermauert wurden, konnten dies bei Systemen mit mehreren Elementen unter Realweltbedingungen nicht genügend demonstrieren.

Im Rahmen dieser Abhandlung soll zu diesem Zweck die Implementierungsstrategie des Hybriden Digitalen Zwillings (HDZ) erörtert werden. Sie soll eine praxistaugliche Möglichkeit darstellen, welche die genannten Implementierungshürden überwinden kann, um das Konzept des DZ in die industrielle Anwendung zu überführen.

Zunächst soll daher das Konzept des HDZ sowie dessen Inspiration präsentiert werden. Anschließend erfolgt die Vorstellung einer Fallstudie, die anhand einer realen und operationellen Produktionslinie die Implementierung eines HDZ zeigen soll. Im Zuge dieser Implementierung sollen auch Strategien zur Validierung und insbesondere Kalibrierung der Simulation diskutiert werden. Nachfolgend erfolgt eine Erörterung von potenziellen Anwendungsmöglichkeiten des HDZ. Abschließend werden offene Problemstellungen identifiziert und das Konzept des HDZ kritisch eingeschätzt.

2 Konzept des Hybriden Digitalen Zwillings

Betrachtet man die Idee des DZ, so kann man erkennen, dass dieser im Wesentlichen aus zwei Elementen besteht: einer Datenkomponente und einer Verhaltenskomponente. Die Datenkomponente besteht aus Mechanismen, wie Daten im physischen System gesammelt, aufgearbeitet und dem DZ in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden können. Die Verhaltenskomponente besteht aus Modellen

und Simulationen, welche das Verhalten des physischen Systems mit genügender Genauigkeit replizieren können. Zwischen diesen Komponenten erfolgt ein bidirektionaler Informationsaustausch. Zusätzlich kann ein DZ je nach Anwendungsfall noch um weitere Komponenten wie z. B. zur Datenanalyse, zur Steuerung des physischen Systems, zur Ergebnisvisualisierung oder zur Orchestrierung von Experimenten erweitert werden.

Das Konzept des HDZ wurde durch Scheer et al. (2023) zum ersten Mal vorgestellt und detailliert beschrieben. Der Begriff wurde durch den Ansatz der hybriden Systemmodellierung nach Mustafee und Powell (2018) inspiriert. Sie beschreiben die hybride Systemmodellierung als einen Einsatz von Simulation in Kombination mit Techniken, welche aus anderen Wissenschaftsfeldern wie bspw. aus der allgemeinen Informatik, Systemtechnik oder Operations-Research stammen können. Nach diesem Vorbild sollen für die Hybridisierung des DZ bereits etablierte Methoden eingesetzt werden, um den DZ effizient implementieren zu können. Das konkrete Ziel der Hybridisierung ist die Substitution einzelner Komponenten des DZ mit bekannten und erprobten Methoden, um die spezifischen Implementierungshürden nach Kuehner et al. (2021) überwinden zu können. Der Fokus der Strategie liegt dabei ausdrücklich auf der Praxistauglichkeit. Eine weitere Quelle der Inspiration sind verwandte Verbundkonzepte zwischen digitalen und physischen Systemen, wie bspw. Online-Simulation oder symbiotische Simulation (vgl. Scheer et al. 2021). Im HDZ soll zudem auch darauf geachtet werden, nur jene Komponenten des Realsystems zu modellieren, die für die Zielerreichung notwendig sind, um den Modellier- und Simulationsaufwand möglichst gering zu halten.

Die Datenkomponente eines DZ muss echtzeitnah Informationen über das physische System bereitstellen. Gemäß dem Grundsatz der Praxistauglichkeit soll im HDZ die Installation zusätzlicher Sensorik und Dateninfrastruktur weitestgehend vermieden werden. Vielmehr sollen bestehende Daten neuartig verwendet werden, um die Funktionalität des HDZ zu gewährleisten. Moderne Fertigungssysteme werden i. d. R. mithilfe eines Fertigungsleiters (Manufacturing Execution System, MES) betrieben. Das MES erhält dabei alle Bewegungsdaten und Zustände aller Elemente in der Fertigung, um diese entsprechend zu leiten. Selbige Daten sollen nun auch die Datengrundlage für den HDZ sein. Speziell soll dabei die Position aller beweglichen Entitäten (z. B. Werkstückträger und Werkstücke) und der Status aller unbeweglichen Entitäten (z. B. Fertigungsmaschinen) bekannt sein. Betrachtet man Datenpunkte aus der Vergangenheit, so lassen sich auch Fertigungsparameter (z. B. Transfer- oder Bearbeitungszeiten) berechnen. Zusätzlich erfassen moderne Fertigungssysteme häufig auch Prozessmessdaten zur Qualitätssicherung, die ebenso wertvolle Informationen enthalten können. Eine Aufarbeitung der Daten kann mittels bekannter Methoden aus dem Wissenschaftsfeld der Wissensentdeckung in Datenbanken durchgeführt werden. Auf diesem Weg soll die Datenkomponente des HDZ den Digitalen Schatten (die Gesamtheit aller bereits gesammelten Daten des Systems) nutzen, um die Simulation des Systems zu ermöglichen. Diese Strategie der Datenakquisition adressiert die Implementierungshürde der Datensammlung und Dateninfrastruktur nach Kuehner et al. (2021).

Die Verhaltens- bzw. Simulationskomponente eines DZ muss die Prozesse des physischen Systems hinreichend genau darstellen. Dabei können je nach Anwendungsfall diverse Modellierparadigmen zum Einsatz kommen. Im HDZ soll die ereignisdiskrete Simulation (EDS) als Prinzipalmodell eingesetzt werden. Die

Nutzung von EDS birgt einige Vorteile. Sie ist methodisch gut erforscht und findet Anwendung in der industriellen Praxis wie z. B. zur Auslegung von Produktionssystemen (Bergmann und Strassburger 2010). Durch die ereignisbasierte Natur von EDS kann sie mit diskreten Informationspaketen gut umgehen. Gleichzeitig können mit EDS verschiedene Modelltiefen (z. B. Fertigungslinie, Maschine, Komponente) umgesetzt und kombiniert werden. Es ist möglich, dass weitere Modellparadigmen im HDZ zum Einsatz kommen können. Sie müssen jedoch dem Prinzipalmodell untergeordnet werden. Mit dieser Vorgehensweise soll die Implementierungshürde der mangelnden Modellier- und Simulationskenntnisse nach Kuehner et al. (2021) adressiert werden.

Die Modellierung des Simulationsmodells erfolgt halbautomatisch, da eine vollautomatische Modellgenerierung signifikante zusätzliche Herausforderungen (Bergmann und Strassburger 2010) für die Implementierung bedeutet würde. Dabei werden grundsätzliche Strukturen (z. B. Maschinen, Förderbänder) manuell modelliert, während Fertigungsparameter automatisch bestimmt und entsprechend angepasst werden. Die Initialisierung des Simulationsmodells erfolgt automatisch mit den echtzeitnahen Daten, die aus dem Digitalen Schatten extrahiert werden. Diese Vorgehensweise riskiert zwar, dass das Simulationsmodell periodisch manuell angepasst werden muss, verringert jedoch den initialen Implementierungsaufwand enorm. Zudem ist zu erwarten, dass sich die manuell implementierten Strukturen nur mit sehr niedriger Frequenz verändern.

3 Prototypische Implementierung

Für die prototypische Implementierung des HDZ wird eine bestehende Produktionslinie verwendet, welche Rotoren für moderne Elektromotoren produziert. Das Produktionssystem befindet sich in Deutschland und operiert seit 2022 im Serienbetrieb.

Der HDZ wird dabei am ersten Segment der Fertigungslinie implementiert. Abbildung 1 zeigt die schematische Struktur dieses Produktionssegmentes. Es besteht aus vier Stationen (S1-S4), welche verschiedene Produktionsschritte vornehmen. Station 1 ist dabei ein manueller Prozess, während alle anderen Prozesse vollautomatisiert ablaufen. Weiterhin enthält das Segment vier Stauförderbänder (F1-F4), die den Materialtransport zwischen den Stationen durchführen. Das Material wird auf Werkstückträgern (WT) transportiert. Die Werkstückträger durchlaufen kontinuierlich die in Abbildung 1 dargestellte Schleife. Dabei wird in Station 1 Rohmaterial zugeführt und in Station 4 ein Zwischenprodukt entnommen.

Produktionsschritte, die auf dieses Segment folgen, werden zunächst nicht betrachtet.

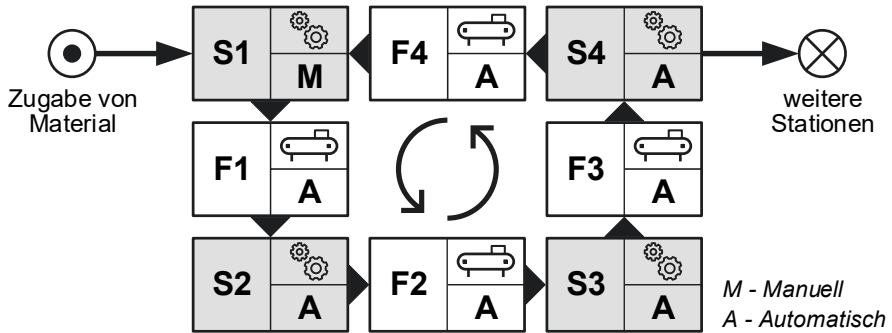


Abbildung 1: Schematische Struktur des Produktionssegments

3.1 Beschreibung der Implementierung

Die Datengrundlage des HDZ sind Kopien von Bewegungstelegrammen, die regulär zur Prozesssteuerung an das Produktionsleitsystem gesendet werden. An jeder Station (S1-S4) wird der Eintritt sowie der Austritt eines WT's registriert. Diese Informationen stehen mit einer Latenz von weniger als einer Sekunde und somit im Anwendungsfall echtzeitnah zur Verfügung. Alle anderen Materialbewegungen müssen algorithmisch abgeleitet werden.

Abbildung 2 zeigt die schematische Struktur des implementierten HDZ. Es ist zu erkennen, dass die Telegramme, die vom physischen System produziert werden, mithilfe von Apache Kafka (einem quelloffenen System für Streaming-Verarbeitung) repliziert werden. Auf diesem Datenstrom setzt ein in Python umgesetzter Microservice auf. Dieser liest Daten ein, extrahiert Informationen und stellt sie Daten aus der Vergangenheit gegenüber. Die Daten werden schließlich in einer Datenbank gespeichert, welche das quelloffene, relationale Datenbankverwaltungssystem MySQL verwendet. Dabei handelt es sich um den Status unbeweglicher Entitäten (z. B. Maschinen), die Position von beweglichen Entitäten (z. B. WT's) und abgeleitete Parameter (z. B. errechnete Zykluszeiten).

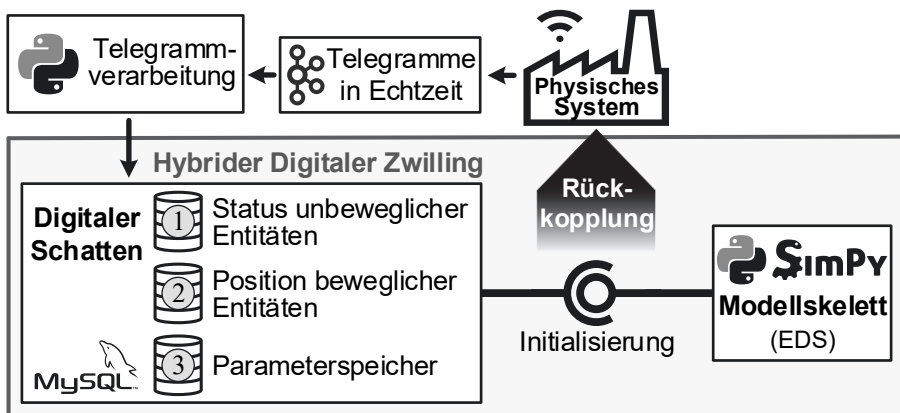


Abbildung 2: Schematische Struktur des implementierten HDZ

Die Simulationskomponente wurde ebenso in Python implementiert. Im Speziellen wurde dabei das quelloffene Paket SimPy (Grayson et al. 2023) zur Modellierung einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation verwendet. Im Moment handelt es sich bei der Simulation um eine deterministische Simulation. Es existieren keine Zufallselemente. Das Modellskelett wird im operativen Betrieb mit den Daten aus dem Digitalen Schatten (Systemparameter und Ist-Zustand des Systems) initialisiert. Ausgehend vom Moment der Initialisierung ist es dann in der Lage, die Zukunft zu simulieren. Das Simulationsergebnis kann dann als Grundlage für eine Rückkopplung zum physischen System genutzt werden.

Alle spezifischen Elemente des HDZ sind in Python implementiert und verwenden ausschließlich quelloffene Software, um möglichst niedrigschwellig auch auf andere Implementierungen übertragen werden zu können. Im Prototyp werden alle Operationen in einer Cloudumgebung ausgeführt.

3.2 Validierung und Kalibrierung

Die Validierung und Kalibrierung des HDZ hat das gleiche Ziel wie bei Offline-Simulationen: es soll bestätigt werden, dass sich keine systematischen Fehler in der Simulation befinden und dass Simulation und Wirklichkeit möglichst wenig voneinander divergieren. Der Unterschied liegt jedoch im betrachteten Zeithorizont. Im Offline-Einsatz von Materialflusssimulation werden taktische oder sogar strategische Zeithorizonte verwendet. Es wird über längere Zeiträume und Experimente versucht, dass sich bestimmte Parameter (z. B. Systemausbringung) in der Simulation mit denen aus der Wirklichkeit decken. Dabei werden auftretende Sonderereignisse (Störungen, manuelle Eingriffe, Qualitätsausfälle etc.) durch pseudozufällige Störungen oder andere Dynamiken in der Simulation approximiert. Im Mittel können so Simulationen mit langfristigen Zeithorizont ähnliche Metriken erzeugen wie ihre abgebildeten Systeme.

Im HDZ, einer Online-Simulation, handelt es sich jedoch um operative Zeithorizonte (Minuten bis maximal Stunden). Es muss an dieser Stelle eine Abwägung getroffen werden. Es stellt sich die Frage, ob auch bei kurzfristigen Zeithorizonten zufällige Sonderereignisse in der Realität durch systematische Anpassung der Simulation Beachtung finden sollten.

Zur Validierung und Kalibrierung wurden die besten 100 Produktionsfenster aus den vergangenen zwei Monaten gewählt. Ein Produktionsfenster hat dabei eine Länge von 100 Zyklen. Ein Zyklus entspricht dabei der erwarteten Zykluszeit der Flaschenhalsstation im System. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der unkalibrierten Simulation. Im oberen Teil der Abbildung (A) ist für jedes Produktionsfenster die relative Abweichung vom maximal gemessenen Produktionsvolumen abgebildet. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass die Simulation für jedes Produktionsfenster ein größeres Produktionsvolumen prognostiziert.

Im unteren Teil der Abbildung (B) wurde für jedes Produktionsfenster nach jedem Zyklus die Position jedes WTs überprüft. Befand sich ein WT in der Simulation auf der gleichen Position (S1-S4 bzw. F1-F4) wie in der Realität, so galt dieses WT als übereinstimmend. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Übereinstimmung in den 100 Zyklen des Produktionsfensters, gemittelt über alle 100 Produktionsfenster.

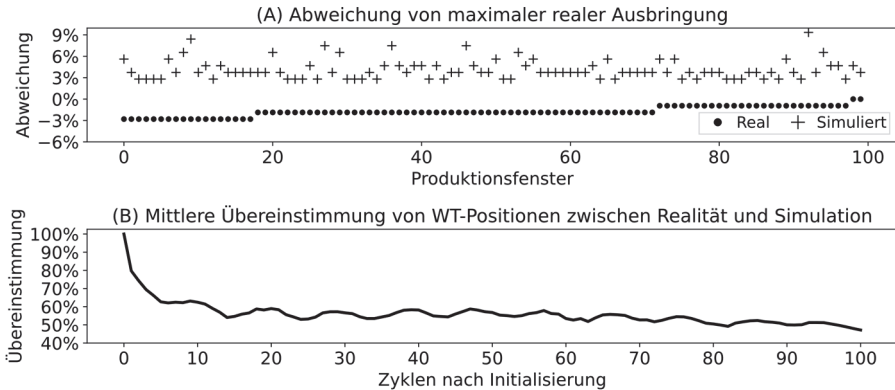


Abbildung 3: Vergleich von Simulation und Realität (unkalibriert)

Es muss nun festgestellt werden, ob diese Simulationsergebnisse ausreichen, um die Simulationskomponente als valide zu klassifizieren. Die Abweichung zwischen Realität und Simulation beträgt je nach Experiment zwischen ca. 4 und 11% (im Mittel über 100 Produktionsfenster ca. 6%). Der einzige Faktor, der die Ausbringung der Simulation in einem Produktionsfenster senken kann, ist ein unvorteilhafter Initialisierungszustand. In der Realität hingegen kann es dafür einige Erklärungen geben: unregelmäßige manuelle Prozesse, Maschinenstörungen, Versorgungsengpässe, Nacharbeit oder Störung vom Materialabfluss durch Flaschenhalse, die sich stromabwärts befinden. Folglich ist zu erwarten, dass die Ausbringung der Simulation mit der des besten Produktionsfensters übereinstimmt oder diese leicht übersteigt. In Abbildung 3 (A) ist dies bei den besten Produktionsfenstern (Nr. 99 und 100) zu erkennen. Damit soll die Simulation zunächst als valide gelten. Die unkalibrierte Simulation repliziert an dieser Stelle das Systemverhalten im Optimum.

Es ist zu erwarten, dass die Übereinstimmung zwischen simuliertem und realem System mit fortschreitender Zeit nach der letzten Initialisierung abnimmt. Im Teil B von Abbildung 3 ist dies zu erkennen. Es ist jedoch auffällig, dass bereits nach ca. 6 Zyklen kein größerer Genauigkeitsgewinn durch eine Initialisierung festzustellen ist.

Die Simulation soll nun kalibriert werden, um ihre Genauigkeit zu erhöhen. Dafür sollen Simulationsparameter (Zyklus- und Transferzeiten) mit Faktoren versehen werden. Ziel ist es dabei, die Übereinstimmung von Simulation und Realität für einen bestimmten Zeitraum zu erhöhen und die Ausbringungsdifferenz zu vermindern.

Für die Kalibrierung wird ein genetischer Algorithmus als metaheuristisches Optimierungsverfahren verwendet. Der Algorithmus wurde mithilfe des quelloffenen Pakets PyGAD (Gad 2021) in der Programmiersprache Python umgesetzt. Dabei soll ein Maß der Abweichung X (berechnet in Gleichung (1)) minimiert werden. Dabei wird für jedes Produktionsfenster (p), jeden Zyklus im Produktionsfenster (z) im Kalibrierungshorizont (z_{kal}) und aus der gesamten Anzahl von WTs (n_{WT}) für jedes WT (w_t) geprüft, ob dessen Position (Pos) in Simulation und Realität übereinstimmen. In die Berechnung fließt dabei auch ein Faktor (F) ein (berechnet in Gleichung (2)), der auf Basis der mittleren relativen Ausbringungsabweichung ($\overline{\Delta A_{rel}}$) das Maß der

Abweichung X skaliert. Der Faktor beschreibt, inwieweit sich die simulierte mittlere relative Ausbringung der kalibrierten gegenüber der unkalibrierten Simulation (ca. 6%) verändert hat. Die mittlere relative Ausbringungsabweichung (Gleichung (3)) errechnet sich aus der absoluten Ausbringung (A) jeden Produktionsfensters.

$$X = F \cdot \sum_{p=1}^{100} \sum_{z=1}^{z_{kal}} \frac{1}{n_{WT,p,z}} \cdot \sum_{wt=1}^{n_{WT,p,z}} \begin{cases} 0, POS_{sim,p,z,wt} = POS_{real,p,z,wt} \\ 1, POS_{sim,p,z,wt} \neq POS_{real,p,z,wt} \end{cases} \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} 1 - 0.5 \cdot (0.06 - \overline{\Delta A_{rel}}), \overline{\Delta A_{rel}} < 0.06 \\ 1 + \overline{\Delta A_{rel}} - 0.06, \overline{\Delta A_{rel}} \geq 0.06 \end{cases} \quad (2)$$

$$\overline{\Delta A_{rel}} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{p=1}^{100} \frac{|A_{sim,p} - A_{real,p}|}{A_{real,p}} \quad (3)$$

Der Kalibrierungshorizont (z_{kal}) ist ein gewählter Parameter, um den Fokus der Kalibrierung zu verschieben. So kann eine Kalibrierung zum Ziel haben, dass die Simulation für einen längerfristigen Zeitraum (z. B. $z_{kal}=100$) möglichst präzise ist. Es ist aber auch möglich, die Simulation so zu kalibrieren, dass sie für wenige Zyklen nach der Initialisierung (z. B. $z_{kal}=10$) präziser ist, auch wenn sie langfristig an Qualität verliert. Abbildung 4 (B) zeigt dieses Ergebnis. In Teil A der Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Ausbringungsabweichung gegenüber der unkalibrierten Simulation (vgl. Abbildung 3, A) verringern kann. Jedoch ist auch zu sehen, dass die Simulation für bestimmte Produktionsfenster weniger Ausbringung vorhersagt, als in der Realität gemessen wurden. Da die Kalibrierung an den besten 100 Produktionsfenstern durchgeführt wurde, handelt es sich dennoch um eine optimistische Kalibrierung.

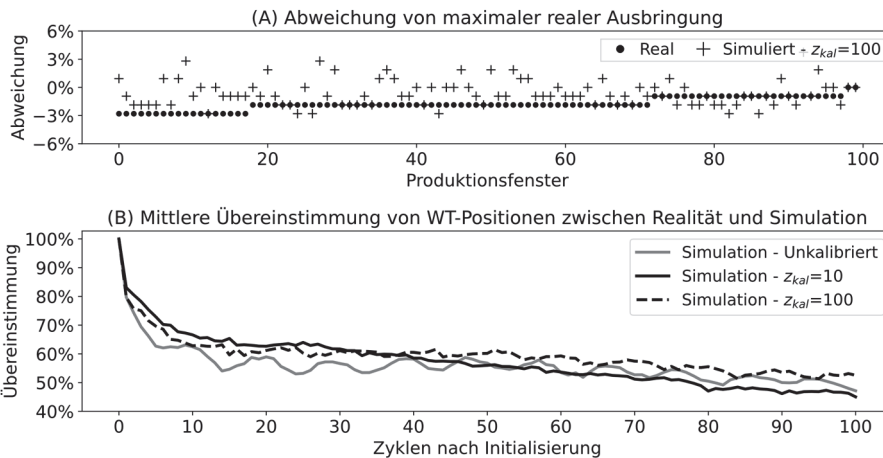


Abbildung 4: Vergleich von Simulation und Realität (kalibriert)

Eine Kalibrierung kann im laufenden Betrieb des HDZ periodisch (z.B. wöchentlich) nach den gewünschten Parametern vollautomatisch durchgeführt werden.

3.3 Initialisierungsfrequenz

An dieser Stelle ist deutlich, dass die Simulation im Rahmen des HDZ nach der Initialisierung an Genauigkeit verliert. Es entsteht dabei ein Dilemma. Abbildung 5 zeigt den Vergleich von Initialisierungsfrequenzen (t) mit 10 bzw. 100 Zyklen.

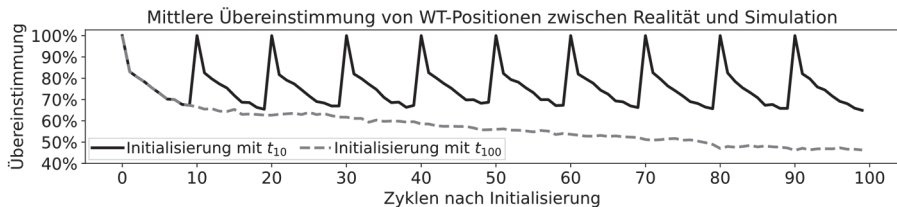


Abbildung 5: Vergleich von Initialisierungsfrequenz t_{10} und t_{100} (kalibriert $z_{kal}=10$)

Wird eine Simulation zu häufig initialisiert, so kann sie nur kurzfristige Prognosen liefern und ihr Nutzen ist reduziert. Wird eine Simulation allerdings nicht häufig genug initialisiert, so verringert sich ihre Genauigkeit und ihr Nutzen ist ebenso reduziert. Da die Simulation auf $z_{kal}=10$ kalibriert wurde und Abbildung 4 zeigt, dass nach ca. 10 Zyklen die Abweichung der Simulation von der Realität nur noch langsam sinkt, wird in diesem Prototyp eine Initialisierungsfrequenz von 10 Zyklen eingesetzt.

4 Nutzbringender Einsatz

Der Nutzen des HDZ lässt sich in drei zeitliche Aspekte gliedern: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Grundsätzlich soll über einen Nutzer mittelbar eine Rückkopplung von Modell zum physischen System erfolgen.

Der HDZ verwendet den Digitalen Schatten des physischen Systems. Somit sind vergangene Zustände, Probleme und Parameter bekannt. Diese können einem Nutzer zur Verfügung gestellt werden. Alternativ kann mithilfe von Diagnosealgorithmen ein Rückschluss auf eventuelle Probleme gezogen werden.

Der HDZ wird mit dem gegenwärtigen Systemzustand initialisiert. Dieser Zustand kann dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden, um eventuelle Probleme direkt lösen zu können. So können bspw. Trends in qualitätsrelevanten Kriterien erkannt werden.

Die Simulationskomponente des HDZ ermöglicht eine Prognose der Zukunft. Ein Nutzer kann auf Basis dieser Prognose Maßnahmen ergreifen, um ein gewünschtes Systemverhalten zu erzeugen. Möglich wären bspw. die Erkennung von Stauszenarien, die Bewertung von Störungen oder das operative Testen von Fertigungsstrategien. Ebenso denkbar ist eine algorithmische Präskription, bei welcher ein Algorithmus auf Basis der Systemprognose kurzfristige Maßnahmen vorschlägt, um bspw. die Systemausbringung zu maximieren. Eine Zukunftsvision ist dabei eine vollautomatische Präskription, die unmittelbar in ein Produktionssystem eingreifen kann. Auf diese Weise würde ein vollautonomes System entstehen.

5 Kritische Würdigung und Weiterentwicklung

Der HDZ stellt einen ersten Schritt in Richtung eines echten praxistauglichen DZ dar. Das Konzept des HDZ konnte hier vorgestellt und anhand eines realen, operativen Produktionssystems prototypisch implementiert werden. Dabei wurde im Speziellen eine mögliche Kalibrierungsstrategie aufgezeigt. Auf diese Weise wurde demonstriert, dass der HDZ bestehende Implementierungshürden überwinden und prinzipiell als taugliche Strategie in der industriellen Praxis eingesetzt werden kann.

Es ist jedoch evident, dass die Entwicklung des Prototyps noch nicht abgeschlossen ist und somit nicht alle Elemente des HDZ überprüft werden konnten. So konnte der praktische Nutzen zunächst nur als Potenzial ausgewiesen werden. Es bedarf weiterer Studien, die sich mit dem praktischen Nutzen des HDZ sowie der Interaktion zwischen Menschen und dem DZ auseinandersetzen.

Gleichzeitig muss der HDZ auf das gesamte Produktionssystem erweitert werden, um alle Gegebenheiten und Wechselwirkungen in der Simulation abbilden zu können. Außerdem muss untersucht werden, wie sich die Genauigkeit der Simulationskomponente weiter erhöhen lässt, damit die Initialisierungsfrequenz reduziert werden kann.

Die Frage nach geeigneten Kalibrierungsstrategien für Online-Simulationen, die in dieser Abhandlung zwar angerissen, aber nicht lückenlos beantwortet werden konnten, müssen in Zukunft weiter behandelt werden. Besonders wichtig ist dabei die Entwicklung einer fundierten Messmethode, um zu überprüfen, wie schnell Simulation und das Verhalten des physischen Systems innerhalb eines operativen Zeithorizonts divergieren.

Literatur

- Bergmann, S.; Strassburger, S.: Challenges for the automatic generation of simulation models for production systems. In: Bruzzone, A.; Vakilzadian, H. (Hrsg.): Proceedings of the 2010 Summer Computer Simulation Conference, Ottawa (Kanada), 11.-14. Juli 2010, S. 545-549.
- Grayson, P.; Scherfke, S.; Luensdorf, O.: SimPy GitLab repository, 2023, <https://gitlab.com/team-simpy/simpy>, letzter Zugriff: 12.05.2023
- Guo, D.; Zhong, R. Y.; Lin, P.; Lyu, Z.; Rong, Y.; Hong, G. Q.: Digital twin-enabled Graduation Intelligent Manufacturing System for fixed-position assembly islands. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 63 (2020) 101917
- Gad, A. F.: PyGAD: An Intuitive Genetic Algorithm Python Library, arXiv 2106.06158 (2021), Ohne Review
- Kuehner, J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. In: Mourtzis, D. (Hrsg.): Procedia CIRP 104 – Proceedings of the 54th Conference on Manufacturing Systems, Patras (Griechenland), 22. - 24. September 2021, S. 1227-1232.
- Matulis, M.; Harvey, C.: A robot arm digital twin utilizing reinforcement learning. Computers & Graphics 95 (2021), S. 106-114.

- Mustafee, N.; Powell, J.: From Hybrid Simulation To Hybrid Systems Modelling. In: Rabe, M.; Juan, A.; Mustafee, N.; Skoogh, A.; Jain, S.; Johansson, B. (Hrsg.): Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Gothenburg (Schweden), 9. - 12. Dezember 2018, S. 1430-1439.
- Roy, R.; Mishara, D.; Pal, S.; Chakavarty, T.; Panda, S.; Chandra, M.; Pal, A.; Misra, P.; Chakravarty, D.; Misra, S.: Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107 (2020), S. 3691-3714.
- Scheer, R.; Strassburger, S.; Knapp, M.: Digital-physische Verbundkonzepte: Gegenüberstellung, Nutzeffekte und kritische Hürden. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): Tagungsband 19. ASIM Fachtagung - Simulation in Produktion und Logistik 2021, Erlangen (Deutschland), 15. - 17. September 2021, S. 11-20.
- Scheer, R.; Strassburger, S.; Knapp, M.: Hybridization of the Digital Twin – Overcoming Implementation Challenges. In: Bui T. (Hrsg.): Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Science, Lahaina (USA), 03. - 06. Januar 2023, S. 1438-1447.
- Zhuang, C.; Liu, J.; Xiong, H.: Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96 (2018) 1, S. 1149-1163.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Schematic Categorization and Definition of Applied and Target-oriented Digital Twins

Schematische Kategorisierung und Definition Angewandter und Zielgerichteter Digitaler Zwillinge

Jan Michael Spoor, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe (Germany),
jan.spoor@kit.edu

Jens Weber, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University Loerrach, Lörrach
(Germany), weberj@dhbw-loerrach.de

Abstract: Digital Twins are of high interest in a variety of research fields as well as industry sectors because they enable, among other things, more efficient maintenance and faster product development and production planning. However, current definitions of Digital Twins in the literature are often varying, contradictory, or non-comprehensive from a practitioner's perspective. Therefore, no universally accepted standardized definition for the development of Digital Twins exists. Thus, we propose a shift in the current scientific discussion towards economic and target-oriented concepts. Our main thesis is that there exists no ubiquitous Digital Twin but specialized concepts for different industry sectors, stakeholders, and applications. We discuss this idea further in the context of the automotive industry. We propose a framework to differentiate versions of a Digital Twin expressed by a morphological matrix in order to make a distinction from pure simulation models. In future work, the usefulness of this framework should be tested and applied for more industry sectors.

1 Introduction

The idea of a Digital Twin (DT), described as a virtual representation of a physical system but also a functional entity on its own, was first defined in 2002 by Grieves. This representation should include all obtainable information of the assets of the real physical system (Grieves and Vickers, 2017). Thus, the DT acts like a physical twin of a system in a virtual set-up. Tao et al. (2019) describe the first few years of research in the field of DTs as a formation stage, until in 2011 the number of publications about the topic started to continually increase. Since 2014, Tao et al. (2019) measured a rapid growth phase of DT research starting with a first white paper by Grieves.

In the literature, Kritzinger et al. (2018) describe 55 % of conducted research about DTs as concepts, while 26 % of papers are described as case studies. However,

Kritzinger et al. (2018) differentiate between research about full DTs, using a bi-directional automated data flow, and Digital Models (DM) with only a manual data flow and Digital Shadows (DS) with only an automated data flow towards the digital representation. Thus, a minority of concepts and use cases discuss (from the authors' perspective) true DTs. In addition, Kuehner et al. (2021) show that most reviews do not provide an explicit definition of DTs and thus, they identify a lack of focus in the terminology of DTs with little progress in the development of a common definition over time. This is highlighted by, e.g., Negri et al. (2017) naming 16 different definitions of a DT. This indicates that there exists a problem with the current methodology in defining a DT and the field of research stagnates in this aspect.

Kritzinger et al. (2018) identify multiple different areas of application of DTs. Biesinger and Weyrich (2019), which focus on the automotive industry, also find different applications and, in addition, benefits of an applied DT in the current body of literature and use cases. Overall, the benefits and applications in the literature are neither mutually exclusively defined nor completely exhaustive but exist in all areas of the business activities of the automotive industry. While the potential business impact in the automotive industry is assumed to be high, Kober et al. (2022) state correctly that the value added by DTs is commonly unclear and intangible. Newrzella et al. (2022) propose a first concept to evaluate use cases and benefits of DTs but do not discuss their relation to the definition of DTs.

This indicates problems in the research field of DTs: definitions are unclear, varying, contradictory, or non-comprehensive, the benefits for companies are only vaguely understood, and the application areas not comprehensively defined. From this follows that no accepted standardized definition for DTs exists. This paper contributes to this discussion first, by a clarification why no standardized concept can exist, since stakeholders, applications, purpose, and industries vary; and second, by making a proposal on how to discuss DTs more targeted. We discuss the literature and the contradicting aspects of the definitions along a developed taxonomy in Section 2. Subsequently, we add important challenges from a practitioner's perspective of a current DT implementation project in the automotive industry in Section 3, which completes and contextualizes the perspective from the literature. As a methodology for a target-oriented DT conceptualization, we propose in Section 4 a framework to discuss the DT concept in future publications or industry projects more focused using a morphological analysis. Using the framework in Section 4, we show in Section 5 an application at a project in the automotive industry to improve the steering of a DT project initiative. An outlook and conclusion are given in Section 6.

2 Literature Review and Set-up of a Taxonomy

A taxonomy is helpful to structure DT concepts in a meaningful way. Thus, we define four categories of aspects of DTs commonly discussed in the body of literature.

The first category is the task of a DT. One frequently mentioned aspect in definitions, use cases, and concepts is the simulation task of DTs. Simulations are often imitations of the physical processes of an asset in order to gain information about future problems occurring in the physical asset. Revetria et al. (2019) state that the common understanding is that DTs are representations reflecting the physical asset. Kritzinger et al. (2018) would otherwise describe the use of DTs as simulation models as DMs since the data flow is not automated in both directions. Borth et al. (2019) explicitly

discuss the bi-directional automated data flow and they connect it with a use case by addressing the control aspects of a DT. Using control and simulation aspects instead of data flow adds benefits to the discussion of DTs: we shift from a technical discussion to a use case discussion. This enables a better understanding of the value and business impacts by DTs. Besides simulation and control, other authors, e.g., Tao et al. (2018), add intelligent optimization as tasks of a DT. Another aspect in the literature is the maintenance or monitoring usage of DTs. Zhuang et al. (2018) describe the DT also as a solution for data management.

The second category is the depth of a DT. This is the precision of the used underlying model and scope of the data flow. Authors such as Brosinsky et al. (2018) define DTs as software-based abstractions of the underlying complex physical systems. The model is not a true copy of the real system but reflects the points of interest of the analysed systems. Other authors such as Glaessgen and Stargel (2012) define the DT as “ultra-realistic”. This is a huge difference to the model-based abstractions and requires much more complex implementations, sensors, and interfaces between DTs and the physical world. The depth is essentially the degree of realism of the DT.

The third category is the width of a DT. In modern production, each system can be disassembled into different interacting subsystems. Different authors state a different number of subsystems necessary to set up a DT. Grieves and Vickers (2017) are describing the DT as exhaustive and using all obtainable information of the assets. Other authors such as Glaessgen and Stargel (2012) define DTs as specialized, only focusing on important parts of the overall system.

Authors focusing on aeronautical applications often define DTs with a high depth but small width. On the other hand, authors from manufacturing often focus more on abstract simulations, which cover the whole production system equally and thus, define DTs with a small depth but high width. This indicates an industry-specific need for definitions. The industry sector might be relevant for a useful DT taxonomy.

The fourth category is the dependency. A common opinion is that a DT strictly follows the physical asset and is a representation of an original object. This is highlighted by Zobel-Roos et al. (2019) defining DTs as copies or by Haag and Anderl (2018) stating that DTs are developed alongside physical models. Kuhn (2017) describes a different approach and states that DTs can exist independently or without physical counterparts.

Besides these technical requirements, the organizational complexity, relevant stakeholders of the DT, and different areas of application also shape the definitions and concepts of DTs. These requirements are from a higher-level perspective since they dictate the purpose and application of the DT but not the technical definition.

3 Challenges from a Practical Application

In this section, we share our lessons, occurring challenges, and problems of the current implementation project of DTs at the Mercedes-Benz Group AG. The focus is on the pain points which occurred during the project. A brief overview is given as follows.

The first pain point is the lack of a standardized definition, which is a phenomenon in the literature as well as in practice. This results in an extensive amount of necessary communication to align ideas, proposals, concepts, and visions for DTs. Furthermore, each new project member needs a specific briefing since each individual definition of a DT highly differs based on experiences and knowledge from former projects.

The next pain point is accelerated due to the large width often associated with DTs. Due to different applications, systems, and areas of applications, experts from product development, maintenance, operations, production planning, and management functions need to align on a common approach and methodology. This kind of interaction is hindered by a different amount of technical knowledge, perspectives, visions, or different approaches and methodologies in different industry fields. Larger project set-ups also lead to staffing shortages.

In addition, current models are often not sufficient for a transfer into a DT. There exist, e.g., no up-to-date kinematic simulation models in operations since simulations are only conducted during planning. After the commissioning, the simulations do not have a back-loop nor updates of the real physical assets. In one example, a model of a lift for a car body lacks the necessary kinematics since the supplier does not validate the lift's behaviour in the planning simulations. Up to now, no resources are assigned to these tasks since no economic reasons exist to develop a full kinematic model of all assets. Furthermore, the required time, process and technical knowledge, and the required materials or software to set up a DT with a high width and depth are extensive and business cases are often opaque. The cost of a DT highly depends on the planned depth and width and a DT project initiative might stress the budgeting of a company.

The final pain point is a tendency to create over ambitious DTs with higher depth and width than necessary. Often, the objectives, and thus, the complexity, are raised in the hope that a future DT will cover every system and aspect of the use case, which then increases budgets and lowers the profitability of the DT. We associate this with the psychological phenomenon in consumer behaviour of the Diderot-Effect proposed by McCracken (1988). Simplified, consumers have a need for completeness and uniformity in a gathered collection. Here, the DT needs to be complete and cover all systems and contingencies. Degnegaard (2010) describes this effect in change management when the scope of projects is continuously increased.

In summary, five challenges occur in a DT development due to an unclear definition:

- Increased communication and alignment efforts in order to define the scope.
- Organizational complexity to align different experts and stakeholders of the DT projects. Thus, also a shortage of staffing can occur.
- Precise data models do not exist and there is only a limited economic incentive to develop models with the necessary depth for DT applications.
- The business case of a DT is opaque which hinders efficient budgeting.
- The Diderot-Effect results in an overambitious scope of DTs.

4 Proposed Morphological Analysis Framework

There are limitations and requirements to separate DTs from digital tools and models:

- A DT must at least have an automated uni-directed interface, either towards the physical or digital representation. A separation of a DS and DT is later discussed, but the proposed framework covers both (Kritzinger et al., 2018).
- A DT differs from a model, simulation, or process mining analysis since its lifecycle exceeds that of a simulation or model. The DT rather covers the whole lifecycle of the (physical) components (Talkhestani et al., 2018).
- A DT acts as a universal interface within the enterprise software landscape and is capable of aggregating data from all sources (Ströer et al., 2018).

The objective of the framework is to include all possible and in literature contradictory definitions to enable a target-oriented DT categorization for a streamlined definition in an application. The given definitions and categories should be mutually exclusive but collectively exhaustive as far as actionable. Therefore, we sometimes combine aspects with a high degree of overlap which the literature often mentions separately.

Within the proposed framework, we differentiate the strategic layer, which covers the industry sector, the organizational set-up, i.e., the target user for the DT, the purpose, i.e., the area of application of the DT, and the business case.

Level (1) of the framework's differentiation is the industry sector. We propose to use the ISIC Revision 4 definition of industry sectors, excluding Section T: activities of household as employers, due to lack of DT relevance, and Section U: extraterritorial organizations, since they are included in Section O: public administration for the purpose of DTs. The defined industry sectors differ significantly regarding requirements, challenges, DT use cases, and economic application. Thus, we assume DT solutions will differ significantly within these industry sectors.

Level (2) covers the internal stakeholders. Stakeholders are the beneficiaries of a DT, which might differ from the users or developers. The here presented stakeholders are related to a functional organization structure but lack the ability to holistically cover all possible set-ups since a wide variety of organizational structures are implemented and differ between industry sectors. Thus, the stakeholders are always customized within the applied company and industry sector. The framework is adjusted for each organization for which it is enrolled but should always reflect the full organizational structure of the company. However, a DT benefits a certain function, defined in the next level in more detail, and thus, respective stakeholders will arise for organizations with a divisional structure or matrix structure within a division or matrix nodes.

As level (3), the area of DT application is defined. We propose for this a macroscopic view of the value creation of an organization founded on the considerations of the resource-based view initially proposed by Penrose (1959). An organization receives inputs and converts these within its own environment into outputs, which are then distributed. Outputs are the products and services offered by the company. Inputs are all resources necessary for production. The transformation process from inputs into outputs is the production. The spatial and temporal provision of goods and the material flow within the production is the distribution of outputs and inputs. The facility covers the business environment. All tasks are organized by an administration. The wording changes within the service industry but the logic stays unchanged. These areas are the resources of an organization. The DT is a company-specific capability of the organization to improve productivity, which then leads to a competitive advantage, based on the definition by Amit and Schoemaker (1993). Further discussion is necessary if distribution must be split up into the logistics supplying resources, the material flow within the facility, and the sales distribution of products and services.

Level (4) covers the definition of the business case, which acts as a guideline for a later operational implementation. This business case specifies the economic optimization objective. Regardless of whether output is maximized given a fixed input or input minimized given a fixed output, the economic objectives are broadly defined either as a revenue increase or a profitability increase. Thus, a DT which optimizes revenue is increasing the number of units produced by an increase in production efficiency, is accelerating the business development by opening new markets, or is

adding value to the product which enables price increases or reaches new customers. If the DT focuses on profit, a reduction in organizational complexity results in reduced fixed costs. A reduction of variable costs is also part of production efficiency. The business case must specify the targeted economic optimization aspect. This simplifies the applied benefits by Biesinger and Weyrich (2019) and creates comprehensive but mutually exclusive categories of business benefits. From an economic perspective, a DT offers particularly high value when the physical counterpart is not available.

The second layer is the operational layer describing the technical DT implementation. The task of the DT is the level (5) and defines the application of DTs. As found in the literature review, tasks are the data management, monitoring, simulation, control, or optimization of the systems which the DT represents. These tasks differ regarding their knowledge creation and data intelligence capabilities. We define predictions as the result of a simulation and system analysis as part of the monitoring. The tasks are not fully mutually exclusive since higher functionalities such as optimization require a data management or simulation capability. Thus, the task can be ordered by their dependency and intelligence capabilities. It is important that, e.g., data management is often not the objective of the DT development and therefore, it is not required to model and design the data management in more depth than necessary to fulfil the higher functions' requirements. Data management and monitoring only require a uni-directional interface, while control and optimization strictly require bi-directional interfaces. This separates the DT and DS along the definition by Kritzing et al. (2018) and is aligned with the statement by Delbrügger and Rossmann (2019) that the common understanding of a DT is that it is more powerful than a DS, which primarily accumulates data. The defined tasks are compatible with most literature taxonomies, e.g., by Kuehner et al. (2021). The tasks of a DT are illustrated in Figure 1.

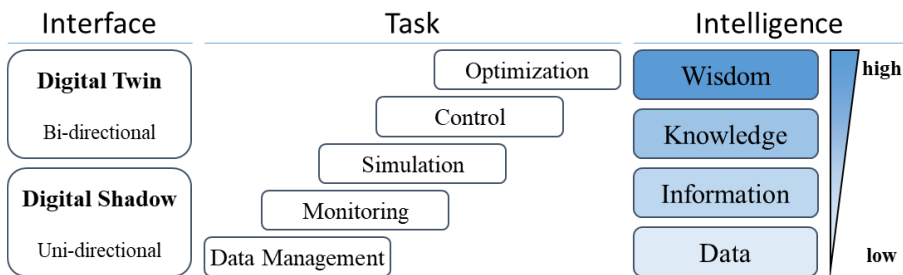


Figure 1: The tasks of a DT along increasingly complex applications of intelligence using the data, information, knowledge, and wisdom approach.

The depth is defined as level (6). This includes the precision of a representation of the physical assets in a virtual realization and the degree of analytical modelling of the physical world. A high depth is represented by “ultra-realistic” DTs as defined by Glaessgen and Stargel (2012). At a medium depth are model-based abstractions, while a low depth covers logical abstractions without physical models. Complementary at level (7), the width covers the scope of interfaces and (sub-)systems. A DT by Grieves and Vickers (2017) has a high width since it covers all the obtainable information, while Glaessgen and Stargel (2012) use a low width by specializing on certain subsystems. Depth and width are not categorical but continuous spectrums of DT implementations. This makes them less comparable, but the defined scope of the DT

should give good indications of these dimensions. The complexity of an implementation scales over-proportionally by the linking between depth and width.

The last level (8) describes the dependency and which system, either the physical or the digital, is the leading system defining the as-is-state. It depends on whether the physical implementation is a representation of the digital set-up, or the digital representation is based on the physical set-up.

The upper management is involved in the strategic definition. The operational project management defines the DT using the strategic alignment. Thus, the operational layer is planned and executed to fulfill the requirements defined by the management in the strategic layer. A technical implementation is in this sense business case and purpose driven. Implementations are only from such width and depth as business cases and strategic objectives require. This approach enables a delimitation of the DT definition and should be applied prior to a use case evaluation as proposed by Newrzella et al. (2022) to ensure comparability of use cases and to define internal responsibilities of stakeholders. The proposed morphological matrix is given in Figure 2.

Strategic Layer	1	Industry Sector	Agriculture (A)	Mining and Quarry (B)	Manufacturing (C)	...		
	2	Stakeholder	Strategy & Controlling	Operations & Supply Chain	Human Resources	Legal & Integrity	Sales & Services	Research & Development
	3	Area	Resources	Production	Facility	Product	Distribution	Administration
	4	Business Case	Production Efficiency	Business Development	Added Value for Customers	Organizational Complexity		
Operational Layer	5	Task	Data Management	Monitoring	Simulation	Control	Optimization	
	6	Depth						
	7	Width						
	8	Dependency	Physical follows digital		Digital follows physical			

Figure 2: The morphological matrix of Digital Twins.

5 Exemplary Application of the Proposed Framework

The framework is applied to an implementation project at the Mercedes-Benz Group AG. First, the strategic layer is defined. The industry sector is given at level (1) of the morphological matrix as “Manufacturing”. While trivial in this case, the development of standard software or DT solutions for specific industry sectors might differ significantly so that the industries must be defined within a management decision.

The upper management is the owner of the DT project and is responsible to fill out the strategic layer of the morphological box. One project module of the DT initiative is in the “Operations” department, more precisely in production planning. This is the stakeholder of the corresponding project module covered by level (2). The production planning focuses on faster start-up times of a new product line. This scope includes

the first production layouts based on the given drafts and prototype vehicles by product development as well as the fine-tuning, supplier selection and steering, and plant construction. The planned improvements are decreasing fix costs of production before the product launch. Thus, the area of application and level (3) of the morphological box is the “Production”. The business case is driven by a decrease of “Organizational Complexity”, which corresponds to level (4). This information is transferred from the management to an operative project leader. The management has defined the strategic objectives of the project and the operative project team must find solutions based on the given requirements by the management.

Next, the operational project team completes the operational layer and proposes a DT of cycle time planning. Until now, cycle times were planned in spreadsheets without interfaces to other systems. A DT of cycle time planning enables a prior planning, testing, and simulation of the proposed cycle time configurations before a physical implementation and thus the dependency, level (8), is “Physical follows digital”. The focus is on a simulation of the cycle time planning, and no data needs to be fed-back into subsequent systems. The objectives of the DT include the validation of alternative cycle time set-ups, benchmarking with the current cycle time configuration, and long-term simulation of cycle times. Thus, the task, level (5), is “Simulation”. Subsequent production or logistic processes are considered as given. New requirements are handed over to the person responsible for these processes. Thus, the width, level (6), is low. The production processes are broken down into subprocesses. Each subprocess has a cycle time imported from a cycle time library. A further break down as by the process library is not necessary. Technological process diagrams or kinematics do not need to be fully recorded. Thus, the depth, level (7), is medium.

Different DT definitions apply for each project, e.g., a development department might focus on added customer value of a product or maintenance might define a DT for the material flow to reduce organisational complexity. Within the same project, multiple different DTs might be developed, and the same stakeholders define multiple DTs for different business cases or application areas. Not all created DTs might be covered by current literature definitions but can be aligned using the proposed framework.

While it is trivial if analyzed ex post, the framework enables an efficient discussion of the objectives, a better common understanding, and accelerated communication and development. It solves following challenges of implementation projects:

- A clear scope of the project is applied. This enables a project monitoring, if the project is still within the defined scope and reduces the Diderot-Effect.
- The framework enables a brainstorming model to discuss concepts and ideas more focused. This optimizes the required amount of communication and alignment.
- A budgeting of the project is facilitated, and an economic business case is communicated and focused. This solves the opaque business case.
- The identification of stakeholders and experts is facilitated. In the given use case, cycle time experts must be involved but process developers or experts from production control are not required. The project team is downsized to the relevant experts. This then saves staffing capacities.
- The technical development tools are set up more efficiently since tools, interfaces, software suppliers, and data sources are defined faster. This is a targeted effort towards specific simulation models and tools with a clearly defined business case. An economic use for, e.g., kinematics, and budgets for these tasks can be justified.

6 Conclusion

This paper provides the research and practitioner community with a framework for defining and categorizing DTs and thus enables a broader view with economic usefulness in mind. We can demonstrate that this definition is helpful for practitioners. From an academic perspective, this shows that a DT is a broader concept consisting of different solutions where digital and physical assets and processes interact. The proposed broader DT concept reflects the wide variety of mutually contradictory definitions without excluding definitions. In addition, it is shown that each DT is different since each has different tasks, objectives, and set-ups. Thus, each DT needs different resources and competencies. Furthermore, this concept enables a novel project management method and structure for an individual development of DTs and a targeted knowledge management for DTs.

To our knowledge, this is the first introduction of a methodological framework for DT projects in practice using a morphological view, combining aspects from engineering, computer science, business economics, organization theory, and project management. We are currently planning a comprehensive validation of the proposed concept using expert interviews from a variety of industry sectors.

References

- Amit, R.; Schoemaker, P.J.H.: Strategic assets and organizational rent. *Strat. Mgmt. J.* 14 (1993), pp. 33-46.
- Biesinger, F.; Weyrich, M.: The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry. In: 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, 2019, pp. 1–6.
- Borth, M.; Verriet, J.; Muller, G.: Digital Twin Strategies for SoS 4 Challenges and 4 Architecture Setups for Digital Twins of SoS. In: 2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE), Anchorage, USA, 2019, pp. 164–169.
- Brosinsky, C.; Westermann, D.; Krebs, R.: Recent and prospective developments in power system control centers: Adapting the digital twin technology for application in power system control centers. In: 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, Cyprus, 2018, pp. 1-6.
- Degnegaard, R.: Strategic change management: Change management challenges in the Danish police reform. PhD Series (2010) 7, Copenhagen Business School (CBS), Frederiksberg.
- Delbrügger T.; Rossmann, J.: Representing adaptation options in experimentable digital twins of production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 32 (2019) 4-5, pp. 352-365.
- Glaessgen, E.; Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Special Session on the Digital Twin, Honolulu, USA, 2012, pp. 1818-1831.
- Grieves, M; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Eds.): *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, Bd. 89, Cham: Springer, 2017, pp. 85–113.
- Haag, S.; Anderl, R.: Digital Twin – Proof of Concept. *Manufacturing Letters* 15 (2018), pp. 64–66.

- International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC) - Revision 4, Series M: Miscellaneous Statistical Papers, No. 4 Rev. 4, New York: United Nations 2007.
- Kober, C.; Adomat, V.; Ahanpanjeh, M.; Fette, M.; Wulfsberg, J.P.: Digital Twin Fidelity Requirements Model for Manufacturing. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Eds.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics, Hannover, Germany, 2022, pp. 595–611.
- Kritzinger, W.; Karner, M. Traar, G.; Henjes, J.; Sihm, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, pp. 1016–1022.
- Kuehner, K.J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. *Procedia CIRP* 104 (2021), pp. 1227-1232.
- Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. *Informatik Spektrum* 40 (2017) 5, pp. 440-444.
- McCracken, G.D.: Culture and consumption: New approaches to the symbolic character of consumer goods and activities. Bloomington: Indiana University Press 1988.
- Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.: A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing* 11 (2017), pp. 939–948.
- Newrzella, S.R.; Franklin, D.W.; Haider, S.: Methodology for Digital Twin Use Cases: Definition, Prioritization, and Implementation. *IEEE Access* 10 (2022), pp. 75444-75457.
- Penrose, E.T.: *The Theory of the Growth of the Firm*. New York: John Wiley 1959.
- Revetria, R.; Tonelli, F.; Damiani, L.; Demartini, M.; Bisio, F.; Peruzzo, N.: A real-time mechanical structures monitoring system based on digital twin, IoT and augmented reality. In: Proceedings of the Annual Simulation Symposium, Society for Computer Simulation International, San Diego, USA, 2019, pp. 1–10.
- Ströer, F.; Sivasothy, P.; Faißt, K.-G.; Apostolov, H.; Eickhoff, T.; Bechev, D.; Bulun, G.; Seewig, J.; Eigner, M.; Sauer, B.: Combined development and test of product-service systems in early product development stages for customized, availability-oriented business models in the capital goods industry. *Procedia CIRP* (2018) 72, pp. 714-719.
- Talkhestani, B.A.; Jazdi, N.; Schloegl, W.; Weyrich, M.: Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. *Procedia CIRP* (2018) 72, pp. 159-164.
- Tao, F.; Cheng, J.; Qi, Q.; Zhang, M.; Zhang, Zhang, H.; Sui, S.: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int J Adv Manuf Technol* (2018) 94, pp. 3563–3576.
- Tao, F.; Zhang, H.; Liu, A.; Nee, A.Y.C.: Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (2019) 4, pp. 2405-2415.
- Zhuang, C.; Liu, J.; Xiong, H.: Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *Int J Adv Manuf Technol* 96 (2018), pp. 1149–1163.
- Zobel-Roos, S.; Schmidt, A.; Mestmäcker, F.; Mouellef, M.; Huter, M.; Uhlenbrock, L.; Strube, J.: Accelerating Biologics Manufacturing by Modeling or: Is Approval under the QbD and PAT Approaches Demanded by Authorities Acceptable without a Digital-Twin?. *Processes* 7 (2019) 94, pp. 1-28.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
 Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
 Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
 DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Digital Twin – Einsatzbereiche des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik

Digital Twin – Digital Twins Applications within Production & Logistics

Carsten Matysczok, UNITY AG, Büren (Germany), carsten.matysczok@unity.de

Abstract: This document provides an overview of digital twin use cases in the area of production and logistics. Starting with relevant definitions for a digital twin and its relation to digital shadow/thread, the main components of a digital twin are presented. Based on this, an overview of digital twin use cases within production and logistics is given. Afterwards an exemplary implementation of a digital twin for a mill center is presented. The paper closes with a summary and outlook on future developments.

1 Einleitung

Digitale Modelle sind in der Industrie ein längst etablierter Standard. Sie werden bei der Produktentwicklung (CAD), der digitalen Absicherung (DMU, Simulation), innerhalb der Produktion (CAM) oder auch im Marketing (fotorealistisches Rendering) eingesetzt. Ziel ist es, noch vor der eigentlichen Produktion oder Benutzung des Produkts unterschiedliche Untersuchungen und Analysen an diesem durchzuführen. Das Konzept des Digitalen Zwillings geht darüber hinaus: Der Digitale Zwilling ist das digitale Abbild eines materiellen Objekts (z.B. Produkt, Produktionsanlage) oder auch eines immateriellen Objekts (z.B. Geschäftsprozess) aus der realen Welt. Er besteht generell aus dem realen Objekt, seinem digitalen Modell und einer Verknüpfung zwischen diesen beiden Welten (siehe Abbildung 1).

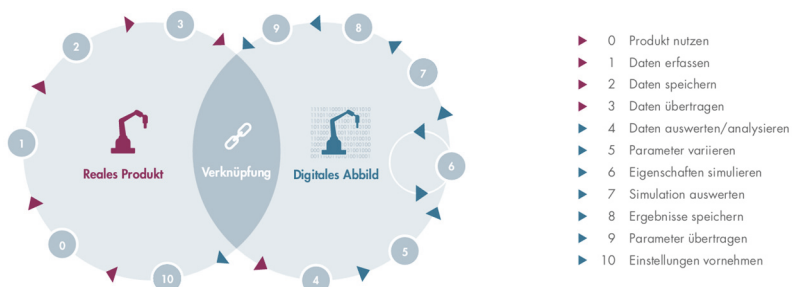


Abbildung 1: Konzept des Digitalen Zwillings (nach Schele und Kühn 2017)

Der Digitale Zwilling bildet das Verhalten realer Objekte in einem digitalen Modell ab. Zu definierten Zeitpunkten werden die Zustände des realen Objekts mit dem digitalen Modell abgeglichen (Wenzel et al. 2017). Dieser Abgleich erfolgt in der Regel über Sensoren, die am realen Objekt angebracht sind, sowie durch Nutzung dedizierter IT-Systeme wie z.B. MES (Manufacturing Execution Systems) oder BDE-Systeme (Betriebsdatenerfassungssysteme). Diese übertragen kontinuierlich aktuelle Zustandsdaten an das digitale Modell. Damit bleibt das digitale Modell nicht nur eine statische Abbildung zum Erstellungszeitpunkt, sondern kann kontinuierlich den Zustand des realen Objekts annehmen.

Auf diese Weise werden virtuelle Echtzeitabbilder geschaffen. Die Daten, die vom realen zum virtuellen Objekt fließen, werden auch Digitaler Schatten, Digital Shadow oder Digital Thread genannt (Grieves 2014). Durch diese können echtzeitfähige Auswertungen realisiert werden, die eine effiziente und effektive Entscheidungsunterstützung z.B. im Bereich der Produktion und Logistik unterstützen (Bauernhansl et al. 2016).

Generell lässt sich sagen, dass der Digitale Zwilling in allen Lebenszyklusphasen nutzbringend eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 2).










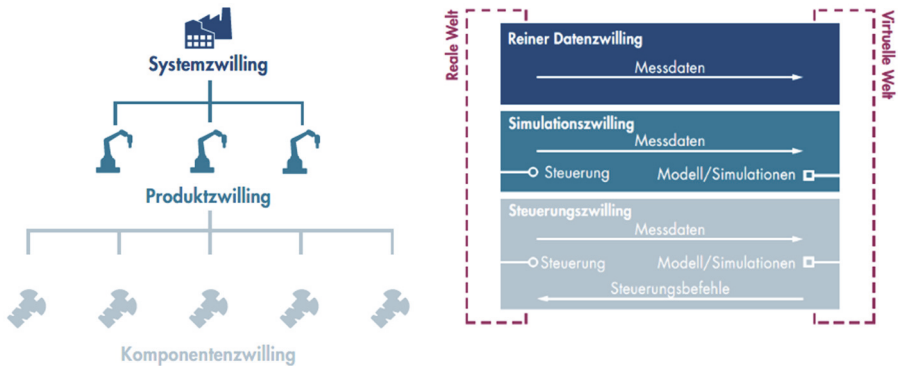
Phase	Produkt-planung	Produkt-entwicklung	Produktions-vorbereitung	Fertigung & Montage	Vertrieb & Versand	Nutzung	Service & Wartung	Demontage & Recycling
	Digitaler Schatten 							
								
	Digitales Modell (DM)			Digitaler Zwilling (DZ)				
Nutzen	Das DM dient als Visualisierungsmodell und ersetzt erste Prototypen.	Das DM bildet das reale Produkt exakt ab und beschleunigt den Entwicklungsprozess.	Mit dem DM der Produktion und des Produktes können Prozesse virtuell abgestimmt werden.	Die Produktion kann sich selbst überwachen. Jedes Produkt erhält einen individuellen DZ.	Der Kunde kann ohne Aufwand Anwendungsfälle testen und Produkte individualisieren	Durch Kommunikation der DZ untereinander und mit der Cloud entsteht ein Netzwerk der DZ.	Mit den Sensoren der Produkte können die DZ die Instandhaltung automatisieren.	Der DZ der jeweiligen Produkte gibt Informationen und Anleitungen am Produktlebensende.

Abbildung 2: Nutzen des Digitalen Zwillings entlang des Lebenszyklus

So können z.B. schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung unterschiedliche Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden, getestet und durch Design-Alternativen abgebildet werden. Hier spricht man i.d.R. noch nicht vom Digitalen Zwilling, sondern vom digitalen Modell, da in dieser Phase noch kein physisches Objekt existiert (Matysczok 2021). Innerhalb der Produktion kann der Digitale Zwilling helfen, die Produktionseffizienz und -qualität zu erhöhen und Produktionskosten zu senken (Matysczok et al. 2018). Während der Betriebsphase eignet sich der Digitale Zwilling, die Verfügbarkeit von Maschinen durch Predictive Maintenance oder Condition Monitoring zu verbessern (Liu et al. 2022). Sogar am Lebensende, dem Recycling, kann der Digitale Zwilling Informationen für die Ersatzplanung oder die Eruierung von Upcycling-Potenzialen bereitstellen (Mügge et al. 2022).

In der Praxis zeigt es sich, dass Digitale Zwillinge sehr anwendungs- und unternehmensspezifisch sind. Es gibt verschiedene Arten von Digitaler Zwillingen – und nicht nur „den einen“ Digitalen Zwilling. Digitale Zwillinge können z.B. anhand

ihres Umfangs (siehe Abbildung 3 a) und der Art ihrer Anwendung (siehe Abbildung 3b) unterschieden werden.



(a) anhand der Art ihres Umfangs

(b) anhand der Art ihrer Anwendung
(Matysczok 2021)

Abbildung 3: Unterscheidung von Digitalen Zwillingen

Je nach Umfang und Art der Anwendung nimmt die Komplexität des Digitalen Zwillings zu. Weitere Definitionen zu Digitalen Zwillingen liefern u.a.: Deuter und Pething 2019, Kuehner et al. 2021 oder Sjarov et al. 2020.

2 Konkrete Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik

Der Digitale Zwilling kann in vielen Bereiche nutzbringend eingesetzt werden. Dieses beinhaltet auch die frühen Entwicklungsphasen, in denen lediglich das virtuelle/digitale Modell existiert. Über den gesamten Lebenszyklus ergeben sich je nach genutzter Technologie eine Vielzahl an möglichen Anwendungsfällen (siehe Abbildung 4).

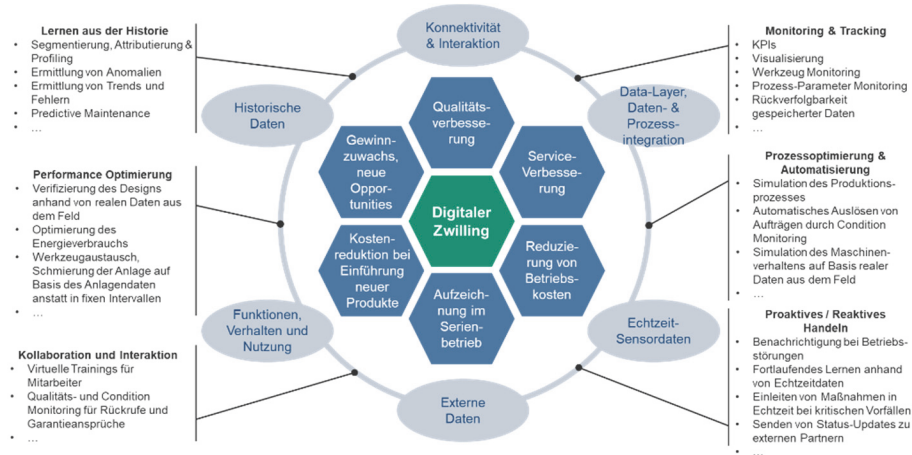


Abbildung 4: Technologien und Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings

So können Digitale Zwillinge in der Logistik (z.B. Beschaffung, Distribution, Filiallogistik, Letzte Meile, Logistiknetzwerk) wie folgt eingesetzt werden:

- Dokumentation des aktuellen Bearbeitungs- und Transportstatus sowie der aktuellen Position (siehe z.B. Gao et al. 2021)
- Detaillierte Transportplanung sowie realistische und belastbare Prognose des Zustellungsdatums und -zeit – insbesondere beim Weitertransport von Waren und bei Warenumladungen sowie bei Just-in-Time (JIT) / Just-in-Sequence (JIS) Lieferungen (siehe z.B. Busse et al. 2021, Herlyn und Zadek 2020)
- Zeitnahes Reagieren auf Transportverzögerungen durch Umplanung oder Nutzung von alternativen Weitertransportmöglichkeiten (Simulation von unterschiedlichen Transportoptionen und Ermittlung einer Vorzugsvariante) mit dem Ziel, den zugesagten Liefertermin einzuhalten (siehe z.B. Gerlach et al. 2021)
- Erfassung und Dokumentation der Transportbedingungen (z.B. Nutzung von Temperatursensoren zum Beleg, dass die Kühlkette beim Transport von Lebensmitteln nicht unterbrochen worden ist, zusätzliche Verwendung der Blockchain-Technologie zur Vermeidung von Datenmanipulationen) sowie automatische Dokumentation der Einhaltung der zugesicherten Transportauflagen/-pflichten (siehe z.B. Rudskoy et al. 2021)
- Reduktion von Sicherheitsbeständen im Lager aufgrund einer realistischeren Transportplanung und verlässlicheren Warenversorgung (siehe z.B. Marmolejo 2020)
- Minimierung des Bullwhip-Effekts in der Supply Chain, indem die ursächlichen Abstimmungs- und Kommunikationsprobleme durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen reduziert werden (siehe z.B. Badakhshan et al. 2022)

Auch im Bereich der Produktion ergeben sich durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen folgende konkrete Anwendungsfälle:

- Vorausschauende Wartung und Instandhaltung von Maschinen und Anlagen (Predictive Maintenance) durch Analyse von Zustandsdaten, Prognose von

Ausfällen sowie Ermittlung des optimalen Zeitpunkts einer bedarfsgerechten Wartung (siehe z.B. van Dinter et al. 2022)

- Optimierung von Produktionssystemen durch Analyse von Maschinenparametern und Simulation von Optimierungsmöglichkeiten im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Herlyn und Zadek 2020)
- Virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen durch Simulation des Verhaltens (Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL)) der eingesetzten Komponente, Maschine oder Anlage inkl. der verwendeten Feldbusse im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Pankow 2021, von Salzburg und Hoher 2020)
- Analyse der Fertigungsleistung und -qualität sowie frühzeitige Ermittlung von Trends (Condition Monitoring, Trend Analysen von Fehlern und Ausfällen) im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Wagner et al. 2021, Ma et al. 2020)

3 Typische Komponenten des Digitalen Zwillings

Zur Abbildung der in Kapitel 2 vorgestellten Anwendungsfälle besteht der Digitale Zwilling typischerweise aus den folgenden sieben Komponenten (siehe Abbildung 5):

1. Reales Objekt: Physisches Objekt in der Realität
2. Virtuelles Modell: Virtuelles Abbild des realen Objekts
3. Sensoren: Die Sensoren sind am realen Objekt angebracht und erfassen kontinuierlich Zustandsdaten. Beispiele für Sensordaten sind Maschinenzustände, der Bearbeitungszustand eines Fertigungsauftrags oder die Motordrehzahl.
4. Zentrale Datenbereitstellung: Die Daten der Sensoren und anderer IT-Systeme werden gesammelt, miteinander in Verbindung gesetzt und zentral zur Verfügung gestellt. Hierfür eignet sich z.B. eine IoT-Plattform (Internet of Things Plattform). Müssen Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen zusammengeführt werden, resultiert das meist in einer Vielzahl an zusätzlichen Schnittstellen, die zwischen den IT-Systemen implementiert werden müssen. Hier kann z.B. der Einsatz des Data-Layer-Konzepts (siehe z.B. Jacob et al. 2008) Abhilfe schaffen.
5. Datenverarbeitung: Eine Datenverarbeitung ermöglicht die Verarbeitung einer hohen Anzahl an Daten. Dieses können zum einen die durch die Sensoren erfassten und in Echtzeit bereitgestellten Daten sein, zusätzlich aber auch historische Daten. Typischerweise findet eine solche Datenverarbeitung am Rande des Netzwerkes (Edge-Computing) oder in der Cloud (Cloud Computing) statt.
6. Simulationsmodell(e): Auf Basis von Simulationsmodellen und der erfassten Daten kann der aktuelle Zustand des realen Objekts ermittelt, Prognosen über künftige Zustände erstellt oder Szenarien zu möglichen Optimierungen durchgespielt werden. Werden dazu unterschiedliche Simulationen durchgeführt (z.B. Materialflusssimulation, Simulation von Bauteilabnutzungen, etc.), müssen auch unterschiedliche Simulationsmodelle bereitgestellt werden.
7. Visualisierungsanwendung: Die erfassten Daten und Simulationsergebnisse werden dann in geeigneter Art und Weise dem Anwender präsentiert. Eine solche Visualisierung kann z.B. in einem 3D- oder VR-Modell erfolgen.



Abbildung 5: Typische Komponenten eines Digitalen Zwillings

4 Realisierung eines Digitalen Zwillings für ein Fräszentrum

Für einen Unternehmen aus der Automobilindustrie wurde ein Digitaler Zwilling eines Fräszentrums realisiert. Gemäß der in Kapitel 1 vorgestellten Kategorisierung handelt es sich hierbei um einen Simulationszwilling. Ziel des Projekts war die Abbildung eines Roboters sowie von zwei Fräszentren als Digitaler Zwilling. Alle Komponenten besitzen eine Reihe von Sensoren (z.B. für Teilebelegung, Temperatur, etc.). Ziel des zu realisierenden Digitalen Zwillings war es, zum einen Optimierungspotentiale für die Belegung und Auslastung des Produktionssystems zu ermitteln (siehe Abbildung 6). Zum anderen sollte eine Anwendung entwickelt werden, mit der weitere Optimierungen der Produktionsanlage simuliert und beurteilt werden können. Dieses sollte während des laufenden Betriebes auf Basis aktueller Sensor- und Produktionsdaten möglich sein.

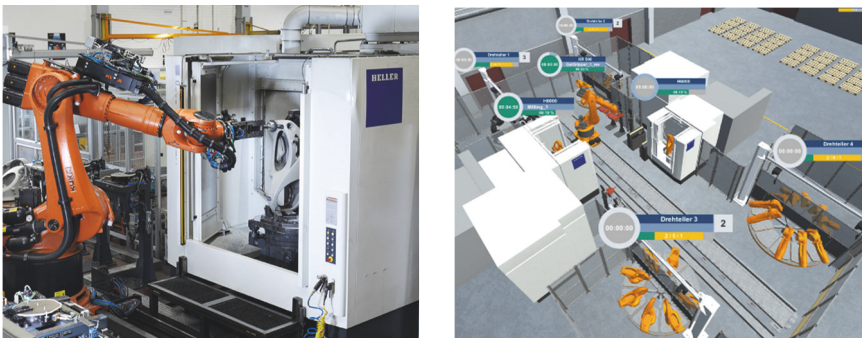


Abbildung 6: Digitaler Zwilling eines Fräszentrums (links: reale Anlage, rechts: Digitaler Zwilling der Anlage)

Der realisierte Digitale Zwilling bestand aus einem Simulationsmodell und einem VR-Modell, mit sich dem die Produktionsprozesse visualisieren lassen. Die Abbildung der einzelnen Produktionsprozesse und die Steuerung der Simulationslogik erfolge auf Basis der vor Ort aufgenommenen und validierten Prozessabläufe. Zur Versorgung des Simulationsmodells mit aktuellen Daten (Auftragsdaten, Arbeitspläne, Durchlaufzeiten, etc.) wurde dieses an eine Connyun IIoT Plattform (Industrial Internet of Things Plattform) angebunden. Die Connyun IIoT Plattform erhielt ihre Daten von MES- und BDE-Systemen sowie von weiteren zusätzlichen Sensoren.

Ein SPS-Daterecording wurde genutzt, um Durchlaufzeiten mittels Histogrammdarstellungen zu validieren. Je nach Aufmaß und Gussstärke variieren dabei die Prozesszeiten (siehe Abbildung 7a). Die Auswertung der über die Connyun-Cloud bereitgestellten Daten ermöglicht die Überprüfung der mannlos gefertigten Teile (siehe Abbildung 7b). Die zu sehenden regelmäßigen Sägezähne bei der Tischbelegung zeigen eine ausreichende Materialversorgung mit allen Bauteilen (siehe Abbildung 7c). Die Auslastung des Fräszentrums konnte optimiert werden: eine verbesserte Ressourcenbelegung mit einer erhöhten Wertschöpfung bis 8% wurden ermittelt (siehe Abbildung 7d).



Abbildung 7: Auswertungen im Digitalen Zwilling

Der realisierte Digitale Zwilling wurde so aufgebaut, dass Fertigungsmitarbeiter auch ohne dedizierte Simulationskenntnisse eigene Optimierungsideen durch einfache tabellarische Eingaben abbilden, testen und bewerten können (siehe Abbildung 8). So konnten Mitarbeiter aus der Fertigung verschiedene Produktionsparameter (z.B.

Puffergröße, etc.) anpassen und testen, bevor diese in die Produktion übernommen werden. Die dargestellten Auswertungen im Digitalen Zwilling ermöglichten es dem Unternehmen dann, den aktuellen Fertigungsstatus und weitere Optimierungsansätze zu bewerten.

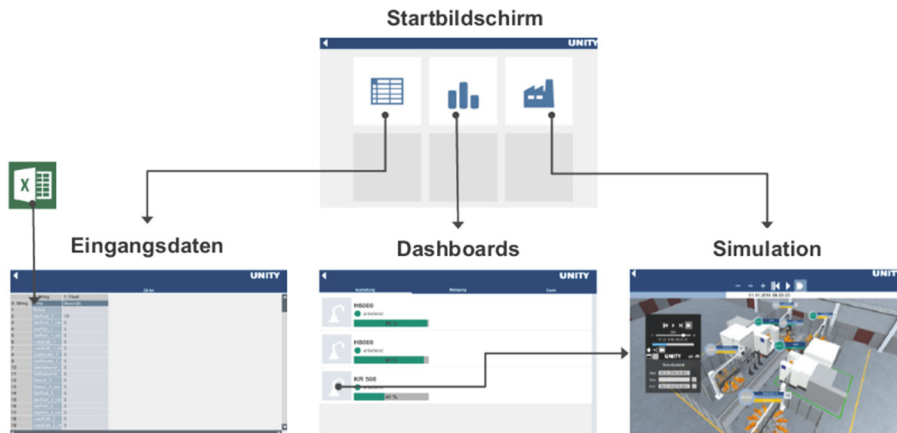


Abbildung 8: Funktionen des realisierten Digitalen Zwillings

So konnten im realisierten Digitalen Zwilling Abweichungen vom Ideal analysiert werden, Optimierungen an der Steuerung oder Fräsprogrammen im dynamischen Modell bewertet, und der Live-Zustand der Anlage visualisiert werden. Die realisierte Anwendung war sowohl stationär auf einem PC als auch mobil auf einem Tabletcomputer/iPad lauffähig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen müssen sich weiter digital transformieren, um in einer digital geprägten Welt auch künftig wettbewerbsfähig agieren zu können. Basis für eine erfolgreiche Transformation ist die konsequente Nutzung digitaler Technologien. Der Digitale Zwilling ist eine solche digitale Technologie. Seine Einsatzbereiche und Nutzenpotentiale im Bereich der Produktion und Logistik wurden in diesem Beitrag vorgestellt.

Die für den Digitalen Zwilling notwendigen Technologien wie z.B. KI (Künstliche Intelligenz), Big Data und weitere Emerging Technologies (IoT, 5G, Edge Computing, etc.) werden sich in Zukunft rasant weiterentwickeln und damit die Hürden für eine Umsetzung senken. Zudem werden sich IoT-Sensoren immer weiterverbreiten, wodurch die Erfassung von benötigten Daten erleichtert wird. Zurzeit investieren Unternehmen stark in die Digitalisierung ihrer Prozesse und Anlagen. Hier wird der Digitale Zwilling wirksame Mittel anbieten, um die betrieblichen Prozesse transparent darzustellen und diese weiter zu optimieren.

Die Visualisierung des Digitalen Zwillings wird künftig vermehrt im Industrial Metaverse erfolgen (siehe Abbildung 9). Das Industrial Metaverse ist ein virtueller Erfahrungsraum, in dem Digitale Zwillinge von vernetzten industriellen Anlagen mit Hilfe von Visualisierungen anschaulich dargestellt und nutzbar gemacht werden

(Marko et al. 2023). Die Bereitstellung der Daten kann über sogenannte Datenräume (z.B. GAIA-X, Catena-X oder Manufacturing X) erfolgen.



Abbildung 9: Darstellung des Digitalen Zwillings einer Fabrik in NVIDIA's Omniverse Plattform (Quelle: BMW AG)

Der Digitale Zwilling ist zudem ein essenzieller Baustein zur Realisierung von intelligenten, vernetzten Fabriken – sogenannte Smart Factories (Matysczok et al. 2023). Solche Smart Factories sind wandelbar, sodass sich Fertigungsanlagen und Logistiksysteme selbständig und ohne menschliche Eingriffe organisieren und fortlaufend an neue Gegebenheiten anpassen.

Es ist ebenfalls abzusehen, dass in der Zukunft nicht mehr allein das physische Produkt, sondern sein digitales Pendant die Wertschöpfung eines Unternehmens bestimmen wird. Ermöglicht wird dieses durch weitere Services und Dienstleistungen (z.B. Condition Monitoring, Predictive Maintenance) rund um das Produkt sowie durch neue Geschäftsmodelle, die sich nur durch Digitale Zwillinge realisieren lassen.

Literatur

- Badakhshan, Ehsan; Ball, Peter; Badakhshan, Ali: Using digital twins for inventory and cash management in supply chains. In: 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM, 2022.
- Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Hrsg.: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP. Darmstadt: Technische Universität, 2016.
- Busse, Anselm; Gerlach, Benno; Lengeling, Joel Cedric; Poschmann, Peter; Werner, Johannes; Zarnitz, Simon: Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains. In: Exploring the Potentials of Automation in Logistics and Supply Chain Management: Paving the Way for Autonomous Supply Chains, 2021.
- Deuter, Andreas; Pethig, Florian: The Digital Twin Theory - Eine neue Sicht auf ein Modewort. In: Industrie 4.0 Management, 2019.

- Gao, Yan; Qian, Shuyue; Li, Zihan; Wang, Ping; Wang, Feiyue; He, Qing: Digital Twin and Its Application in Transportation Infrastructure. In: 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), 2021.
- Gerlach, Benno; Zarnitz, Simon; Nitsche, Benhamin; Straube, Frank: Digital Supply Chain Twins—Conceptual Clarification, Use Cases and Benefits. In: Logistics, Volume 5, 2021.
- Grieves, Michael: Digital Twin – Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (Whitepaper), LLC, 2014.
- Herlyn, Wilmjakob; Zadek, Hartmut: Mastering the Supply Chain by a Concept of a Digital Control-Twin. In: Data science and innovation in supply chain management, 2020.
- Herlyn, Wilmjakob; Zadek, Hartmut: Der Digitale Steuerungs-Zwilling - Dynamische Auftrags- und Materialflusssteuerung auf Basis des Konzeptes eines digitalen Steuerungs-Zwillings. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 2020.
- Jacob, Bruce; Ng, Spencer W.; Wang, David T.: Memory Systems – Cache, DRAM, Disk. Morgan Kaufmann, 2008.
- Kuehner, Kim Jessica; Scheer, Richard; Strassburger, Steffen: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. In: Proceedings of CIRP – Material Aspects of Manufacturing Processes, Volume 104, 2021.
- Liu, He; Xia, Min; Williams, Darren; Sun, Jianzhong; Yan, Hongsheng: Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. In: Intelligent Sensing, Monitoring, and Optimization of Advanced Manufacturing Systems, 2022.
- Ma, Jun; Chen, Huimin; Zhang, Yu; Guo, Hongfei; Ren, Yaping; Mo, Rong; Liu, Luyang: A digital twin-driven production management system for production workshop. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 110, 2020.
- Marko, Angelina; Plass, Chrisoph; Kuttner, Diemar; Laß, Dietmar; Bashiri, Erfan; Barnstedt, Erich; Piller, Frank; Heinrich, Henning; Gayko, Jens; Wirth, Jonas; Görlitz, Julia; Hoffmann, Martin; Wittek, Nick; Madeja, Nils; de Beauregard, Paul; Kiradjie, Plamen; Müller, Sascha; Lehman Brauns, Sicco; Falk, Svenja; Kroke, Ted; Guggenberger, Tobias; von Diemar, Undine: Impulspapier Industrial Metaverse, 2023.
- Marmolejo-Saucedo, Jose Antonio: Design and Development of Digital Twins: a Case Study in Supply Chains. In: Mobile Network Application, Volume 25, 2020.
- Matysczok, Carsten: Kernelement künftiger Wertschöpfung – Optimierungen am digitalen Zwilling verproben. In: IT@Production, 10/2021.
- Matysczok, Carsten; Arnholt, Dennis; Bracht, Uwe; Sauer, Olaf; Seewaldt, Marco; Wenzel, Siegrid; Zülch, Gerd: Die Digitale Fabrik – Treiber der Digitalen Transformation, VDI-Roadmap, 2023.
- Matysczok, Carsten; Schele, Moritz; Kühn, Moritz: Mit dem Digitalen Zwilling Wettbewerbsfähigkeit sichern. In: Mitteldeutschen Mitteilungen des VDI, 2/2018.
- Mügge, Janine; Hahn, Inka Rebekka; Riedelsheimer, Theresa; Chatzis, Johannes: Digital Twins for Circular Economy – Enabling Decision Support for R-Strategies. In: Industrie 4.0 Management, Volume 6, 2022.
- Pankow, Gabriel: Der durchgängige Digital Twin macht's möglich – Umsetzung und Vorteile einer virtuellen Inbetriebnahme. In: Produktion, 2021.

- Rudskoy Andrey; Ilin, Igor; Prokhorov, Andrey: Digital Twins in the Intelligent Transport Systems. In: Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021.
- Schele, Moritz; Kühn, Markus: Vorsprünge durch Digitale Zwillinge. In: Smart Engineering, No. 5, 2017.
- Sjarov, Martin; Lechler, Tobias; Fuchs, Jonathan; Brossog, Matthias; Selmaier, Andreas; Faltus, Florian; Donhauser, Toni; Franke, Jörg: The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2020.
- van Dinter, Raymon; Tekinerdogan, Bedir; Catal, Cagatay: Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. In: Information and Software Technology, Volume 151, 2022.
- von Salzburg, Güntner; Hoher, Simon: Digital Twins im Anlagen-Lebenszyklus. In: White Paper des DTZ Salzburg, 2020.
- Wagner, Sarah; Milde, Michael; Barhebwa-Mushamuka, Félicien; Reinhart, Gunther: Digital Twin Design in Production. In: Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems, 2021.
- Wenzel, Sigrid; Jessen, Ulrich; Stolipin, Jana: Rolle der Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Aufgaben und Integration. In: Gronau, N.: Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation. Hrsg.: Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (WGAB), 2017.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Vernetzter Digitaler Zwilling zur Einbeziehung der Materialflusssimulation während der Produktentwicklung

Connected Digital Twin for Incorporating Material Flow Simulation During Product Development

Annika Lange, Jan Torka, Jean-Paul Goppold, Thomas Knothe
Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin
(Germany)

{annika.lange, jan.torka, jean-paul.goppold, thomas.knothe}@ipk.fraunhofer.de

Abstract: Changeable production systems do not consider the development and design of a product comprehensively enough. Material flow simulations are useful for considering product changes from a production point of view when used to verify concepts in the planning phase and to check for weak points. While simultaneous engineering is made possible by creating a material flow simulation at an early stage of product development, the creation of simulations is very time consuming and the added value of a simulation is often not fully recognised. In this paper, a concept is presented that helps to reduce the effort of creating and adapting simulation models by relying on the properties of flexibility and easy reconfigurability of adaptive production systems.

1 Problembeschreibung und Bedarf

Schon immer sind produzierende Unternehmen vom Wandel betroffen (Neuburger, 2019). So beeinflussen Megatrends die Fabrikgestaltung mit deren Prozessen sowie die Produktentwicklung. Ein Megatrend, der die Fabrikgestaltung und Produktentwicklung adressiert, ist die steigende Komplexität von Produktion und Produkten aufgrund steigender Individualisierungsmöglichkeiten am Produkt (Westkämper, 2013; Kohl et al., 2021). Neben der steigenden Komplexität werden die Produktentwicklungszyklen kürzer und treten in einer höheren Frequenz auf (Lescher, 2008). Um auf solche Megatrends reagieren zu können, unterstützt das Konzept der wandlungsfähigen Produktionssysteme (Westkämper und Zahn, 2009; Kohl et al., 2021). Die Wandlungsfähigkeit ist gekennzeichnet durch einen geringen Aufwand für die zielgerichtete Neu- oder Rekonfiguration der Wandlungsobjekte. Dies sind die Objekte, an denen der Wandlungsprozesse durchgeführt wird und die für den

wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens wichtig sind (Hernandez Morales, 2002). Durch Wandlungsbefähiger wie beispielsweise Modularität oder Mobilität erfolgt der Wandlungsprozess (Hernandez Morales, 2002). Mit der Konstruktion und Entwicklung neuer Produkte beziehungsweise Änderungen an bestehenden Produkten verändert sich der Fertigungsprozess und somit auch das Produktionssystem. Forschungsprojekte wie z.B. iVIP (Krause et al., 2002) und ISYPROM (Beier et al., 2012) haben sich mit der Verknüpfung von Produktentwicklung und der einhergehenden Planung von Produktionssystemen auseinandergesetzt, dennoch bleibt die Einbeziehung unzureichend.

Im Product Lifecycle Management (PLM) wird zwar der gesamte Produktentstehungsprozess betrachtet von dem ersten Entwurf über die Konstruktion, die Produktion bis hin zu Dienstleistungen. Dennoch erfolgen die Phasen sequenziell, sodass die Produktionsplanung und dessen Prüfung der Machbarkeit erst nach Abschluss der Konstruktion erfolgen. Um Änderungen am Produkt auch aus fertigungstechnischen Aspekten zu betrachten, ist beispielsweise eine Materialflusssimulation erforderlich. Diese dient dazu, Konzepte in der Planungsphase hinsichtlich Schwachstellen und Machbarkeit zu untersuchen. Durch das frühe Erstellen einer Materialflusssimulation – bereits während der Produktentwicklung – entsteht ein Simultaneous Engineering. Durch die Materialflusssimulation können frühzeitig Auswirkungen durch die Neukonstruktion des Produktes analysiert werden. Ebenfalls ermöglichen diese die ganzheitliche Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungstechnik sowie Fabrikplanung. Zwar ist Simultaneous Engineering kein unbekanntes Konzept mehr, dennoch wird in diesem frühen Stadium bisher selten eine Materialflusssimulation erstellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erstellung von Materialflusssimulationen mit einem großen Aufwand verbunden ist, sodass trotz der Vorteile einer Materialflusssimulation häufig der Mehrwert dieser nicht umfassend erkannt wird. Insbesondere die Erfassung von erforderlichen Daten ist mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden (Herbert et al., 2021). Kommt es während der Erstellung der Materialflusssimulation zu einer Anpassung im Konzept, ist dies ebenfalls mit einem erhöhten Aufwand in der Anpassung bei der Materialflusssimulation verbunden.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz aufgezeigt, wie mittels verschiedener vernetzter Digitaler Zwillinge (DZ) eine Materialflusssimulation bereits während der Produktentwicklung aufwandsarm erstellt werden kann. Ein DZ ist das virtuelle Abbild eines physischen Systems. Dieser hat eine automatisierte bidirektionale Datenverbindung zwischen dem virtuellen Abbild und dem physischen System, dass durch Interoperabilität gekennzeichnet ist (Rainer Stark et al., 2020; Kuehner et al., 2021). Ein DZ kann sich über mehrere Lebensphasen erstrecken und wird in einen Digitalen Master und Digitalen Schatten unterteilt. Der Digitale Master wird durch Daten in der Planungsphase gebildet, der Digitale Schatten durch Daten aus der Produktion, der Verwendung sowie dem End-of-Life (Riedelsheimer et al., 2021).

2 Stand der Technik

Morshedzadeh et al. (2018) beschreiben einen Ansatz zur eventdiskreten Simulation unter Einsatz von einem PLM System. Die Stückliste, die Prozessliste sowie die Ressourcenliste werden dafür in das PLM System überführt. Durch diese Struktur werden bereits für die Simulation notwendige Daten wie beispielsweise Ausfallzeiten

und Schichten in dem PLM System bereitgestellt. Diese Daten werden über einen Import in das Simulationstool Tecnomatix Plant Simulation überführt.

Fischer et al. (2017) betrachten die Erstellung von Simulationsmodellen für cybertronische Produktionssysteme. Dazu werden zunächst Produkt-, Maschinen und Transportagenten erstellt, die die erforderlichen Daten für die Simulation generieren. Diese Daten werden in Teamcenter integriert und über eine vordefinierte Schnittstelle an Tecnomatix Plant Simulation übergeben. Die Ergebnisse der Simulation werden in Form eines HTML Reports an Teamcenter zurückgegeben.

Pöge und Meyer (2021) betrachten die Integration von Daten aus einem Produktdatenmanagement (PDM) System in die Materialflusssimulation. Damit die Daten für die Simulation verfügbar sind, ist ein manuelles Datenmanagement erforderlich. Die Ergebnisse aus der Simulation sollen automatisch in das Datenmanagement aufgenommen werden. Dies bietet den Vorteil, dass alle Daten zentral verwaltet werden. Nach Abschluss der Simulation und dessen Ergebnisintegration in das PDM System, kann dort die Auswertung durchgeführt werden. Änderungen in der Planung werden auf Revisionsebene im PDM System verknüpft. Dies ermöglicht die Nachvollziehbarkeit, welche Daten in der Materialflusssimulation integriert wurden. Im letzten Schritt erfolgt die automatisierte Erzeugung von 3D-Modellen.

Die Ansätze zeigen auf, dass bereits Daten aus dem Produktlebenszyklus mit in die Erstellung von Materialflusssimulationen einbezogen werden. Dennoch bezieht keiner der vorliegenden Ansätze explizit die Produktentwicklung mit ein.

Bei der automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen kann nach Milde und Reinhart (2019) in drei Kategorien unterschieden werden. Diese können den folgenden Phasen der VDI 3633 (2014) zugeordnet werden:

- Modellentwicklung während der Systemanalyse,
- Parametrisierung des Modells während der Datenaufbereitung,
- Implementierung des formalen Modells.

Eine hohe Zahl der bestehenden Ansätze betrachtet jeweils nur eine der Kategorien (Milde und Reinhart, 2019). Häufig wird die automatisierte Parametrisierung des Modells fokussiert. Diese Ansätze verfolgen die Aufbereitung von Rohdaten, sodass diese in dem Simulationsmodell verwendet werden können (Skoogh et al., 2012; Barlas und Heavey, 2016).

Dennoch existieren Ansätze, die alle drei Kategorien betrachten. Mit Hilfe des Global Positioning Systems können während des Teiletransport Beschleunigungs- und Sensordaten erhoben werden. Auf dessen Basis wird der Materialfluss digital rekonstruiert. Daraufhin wird durch einen Modellkonfigurator das Materialflusssimulationsmodell automatisiert erzeugt. Einzelne manuelle Änderungen sind darüber hinaus notwendig (Smith, 2015). Auch der Ansatz nach Milde und Reinhart (2019) eliminiert zeitaufwendige Schritte. Dennoch bezieht keiner der Ansätze zur automatisierten Simulationsmodellerstellung die Produktentwicklung mit in die Erstellung des Materialflusssimulationsmodells mit ein.

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, bereits in der Produktentwicklung eine Materialflusssimulation zu erstellen. Durch den Einsatz und die Verknüpfung von verschiedenen DZ soll der Aufwand zur Generierung des Modells reduziert werden.

3 Konzept des vernetzten Digitalen Zwillings

Der digitale Produktzwilling wird durch die Konstruktionszeichnung abgebildet. Das kinematische Modell der Fertigungszelle bildet den digitalen Zwilling der Fertigung ab. Durch das integrierte Prozessmodell werden die Prozesse des Unternehmens im digitalen Prozesszwilling abgebildet. Schlussendlich bildet das Simulationsmodell aus Sicht der Materialflussplanung den Fabrikzwilling ab. In diesem Beitrag beschränkt sich der Fabrikzwilling auf eine einzelne Linie. Der Ansatz ist allerdings so aufgebaut, dass dies auch auf eine gesamte Fabrik skaliert werden kann. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Digitalen Zwillinge mit ihren zugehörigen physischen Systemen auf.

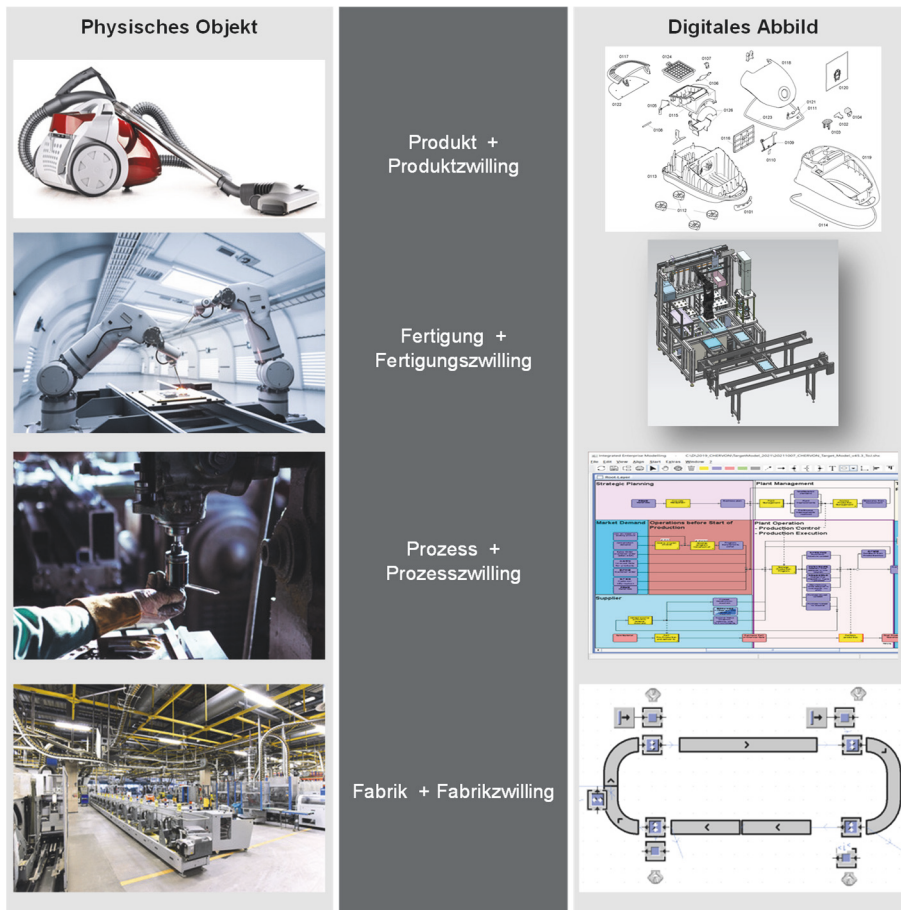


Abbildung 1: Zuordnung der physischen Objekte zu dessen digitalen Abbildungen

3.1 Beschreibung des Ansatzes

Der vernetzte Digitale Zwilling ist Bestandteil des Blue Print Plant Models (BPPM) und stellt eine Vernetzung der in Abbildung 1 dargestellten DZ dar. Das BPPM ist eine Erweiterung der technologieorientierten Fabrikplanung (Lange et al., 2023). Bei

dieser werden bereits zu Beginn der Planungen Technologien und Prozesse mitberücksichtigt (Glodde et al., 2020). Im Gegensatz zu der technologieorientierten Fabrikplanung sieht das BPPM vor, die Planung nicht von einem weißen Blatt zu starten (Lange et al., 2023). Der Ansatz beschränkt sich nicht nur auf die Fabrikplanung, ebenfalls kann es auch im operativen Geschäft angewendet werden. Wie auch bei der technologieorientierten Fabrikplanung bildet das BPPM ein Prozessmodell auf Basis der integrierten Unternehmensmodellierung (IUM) ab. Die IUM umfasst ein Prozessmodell, indem die Abläufe dargestellt werden sowie ein Informationsmodell, das Objekte inklusive dessen Ausprägungen in Form von Attributen darstellt (Spur et al., 1993). Zur Modellierung wird das am Fraunhofer IPK entwickelte Tool MO²GO verwendet (Fraunhofer IPK, 2018). Neben dem Prozessmodell ist ein vernetzter Digitaler Zwilling Bestandteil des BPPM (Lange et al., 2023), der nachfolgend erläutert wird. In Abbildung 2 wird der schematische Zusammenhang zwischen den einzelnen Elementen dargestellt.

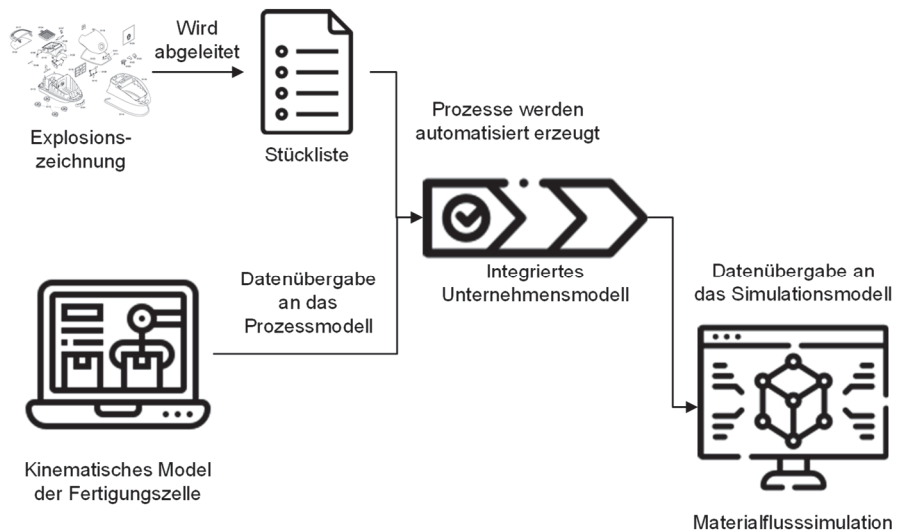


Abbildung 2: Schematischer Zusammenhang der einzelnen Komponenten

Vernetzung vom digitalen Produkt- und Prozesszwilling

Mithilfe des PLM wird begonnen, ein Entwurf eines neuen Produktes auszuarbeiten und im Anschluss aufbauend die Konstruktion zu erstellen. Ergebnis der beiden Phasen ist unter anderem eine Stückliste des Produktes. Mithilfe der Explosionszeichnung werden die notwendigen Prozessschritte identifiziert, um das Produkt zusammen zu fügen. Darüber hinaus lässt sich die Reihenfolge ermitteln, in welcher die Einzelteile zum Endprodukt zusammengefügt werden können. Im Anschluss wird unter Zuhilfenahme der Stückliste, ein Produktionsprozess erzeugt, wobei die Produkte im Modell die einzelnen Elemente der Stückliste und die anfangs ermittelten Prozessschritte – die Aktionen im Modell – repräsentieren. Die notwendige Zeit zur Erstellung des Modelles kann durch den Einsatz von einem

Modulbaukasten erheblich reduziert werden. Abschließend wird das erzeugte Modell in das bestehende Prozessmodell in dem Modellierungstool MO²GO integriert (Torka et al., 2021). Durch die Erzeugung eines Prozessmodells werden die vorherigen und nachfolgenden Prozessschritte für die Materialflusssimulation ersichtlich.

Vernetzung vom digitalen Fertigungs- und Prozesszwilling

Aus fertigungstechnischer Sicht wird ein kinematisches Modell erstellt, das die Fertigungszelle abbildet. Dies wird beispielsweise mit Solid Works oder Siemens NX erstellt. Durch das kinematische Modell wird sichergestellt, dass alle Prozessschritte in der Fertigungszelle ausgeführt werden können. Darüber hinaus werden aus dem kinematischen Modell Prozesszeiten ermittelt, die in der Materialflusssimulation verwendet werden. Die Prozesszeiten werden über einen Adapter an das Prozessmodell übermittelt und in Form eines Attributs bei dem jeweiligen Prozessschritt hinterlegt.

Vernetzung vom digitalen Fabrik- und Prozesszwilling

In dem Informationsmodell des Prozessmodells werden die für die Simulation benötigten Informationen verwaltet (siehe Abbildung 3). Durch das Attribut *Automatisierung* wird geprüft, ob ein Werker für den Bearbeitungsschritt erforderlich ist oder nicht. 0 steht dabei für nicht automatisiert und 1 für automatisiert. Die Attribute *Pos_X*, *Pos_Y* und *Pos_Z* beschreiben, wo sich die Fertigungszelle im Layout befindet. Die Prozess- und Rüstzeiten werden in dem Informationsmodell in Sekunden als Integer-Werte erfasst und bei der Verarbeitung in Siemens Tecnomatix Plant Simulation in das entsprechende Dateiformat überführt.

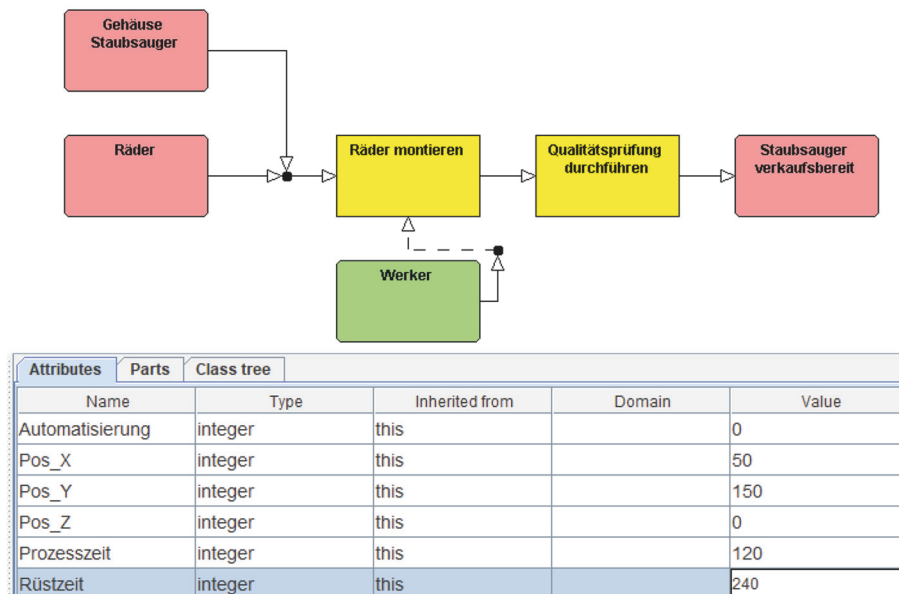


Abbildung 3: Exemplarische Sicht des Prozessmodells mit Ausschnitt des Informationsmodells für Prozessschritt 1

Die Materialflusssimulation wird mit Tecnomatix Plant Simulation dargestellt. Die Schnittstelle zwischen der Materialflusssimulation und dem Prozessmodell bildet ein Adapter. Dieser Adapter ist direkt mit dem Prozessmodell verbunden und stellt eine REST-API zur Verfügung. Die angefragten Daten werden ins JSON-Format transformiert und an Tecnomatix Plant Simulation übergeben. Durch einen Algorithmus in SimTalk werden die Daten in die entsprechenden Tabellen in das Simulationsmodell geschrieben. Die Stationen werden auf Basis eines Algorithmus in SimTalk automatisiert erzeugt und auf Basis der Informationen zur Position entsprechend in dem Simulationsmodell platziert.

Die bei der Simulation erzeugten Daten, wie beispielsweise Auslastung von Maschinen oder Mitarbeiter, aber auch Durchlaufzeiten werden über den Adapter zurück an das Prozessmodell (siehe Abbildung 3) gegeben und in diesem gespeichert. Neben den oben erwähnten Attributen können noch zusätzlich Attribute erzeugt werden, in welchen die Simulationsergebnisse gespeichert werden und somit weiteren Systemen zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Der Prozessassistent (PA) ist ein webbasiertes System, das bei der Analyse von Geschäftsprozessen unterstützt. Die Grundlage dafür bildet das in MO²GO erstellte Prozessmodell (Fraunhofer IPK).



Abbildung 4: Dashboard zur Darstellung der Ergebnisse aus der Materialflusssimulation

Die Ergebnisse aus der Materialflusssimulation werden wieder an das Prozessmodell übergeben und in einem Dashboard grafisch dargestellt (Abbildung 4).

3.2 Anwendungsbeispiel

Ein Unternehmen stellt Heimwerkzeuge in einer manuellen Montagelinie her. Es liegt zwar eine hohe Variantenanzahl der einzelnen Produkte vor, dennoch sind alle Varianten standardisiert und es kommt nicht zu kundenindividuellen Anpassungen. Das Ziel ist es, die Stärken im Bereich High-Mix-Low-Volume auszubauen. Dazu möchte das Unternehmen einerseits seinen Automatisierungsgrad erhöhen sowie die Rüstzeiten reduzieren. Dies soll durch die Entwicklung und den Aufbau einer Linie erreicht werden, die mit modularen Montagezellen ausgestattet ist. Diese Montagezelle muss zunächst konstruiert werden. Mittels des kinematischen Modells wird zunächst geprüft, ob die Produkte wie geplant in der Montagezelle montiert werden können. Auf Basis von Konstruktionszeichnungen des zu fertigenden Produkts wird über die Stückliste der Montageprozess automatisiert erzeugt. Durch

die Materialflusssimulation wird sichergestellt, dass die Reduzierung der Rüstzeit wie geplant realisiert wird. Zusätzlich wird geprüft, ob die Montagelinie immer noch die weiteren betriebswirtschaftlichen Aspekte wie z.B. die geplanten Durchlaufzeiten erzielt. Die Daten aus der Materialflusssimulation werden zurück an das Prozessmodell gegeben und in einem Dashboard dargestellt. Anhand dessen können Auswertungen und weitere Optimierungen vorgenommen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Simultaneous Engineering ist kein neues Konzept. Dennoch werden Materialflusssimulationen gerade in der frühen Produktentstehungsphase oft nur dann integriert, wenn bestehende Fertigungslösungen grundsätzlich verwendet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erstellung und Änderungen von Materialflusssimulationen mit einem erhöhten zeitlichen Aufwand verbunden sind. In diesem Beitrag wird thematisiert, wie durch die Verknüpfung von verschiedenen DZ, Simulationsmodelle bereits während der Produktentwicklung (Entwurf und Konstruktion) mit einem geringen Aufwand erstellt werden können. Dazu werden ein Produkt-, Fertigungs-, Prozess- sowie Fabrikzwilling miteinander vernetzt. Der Prozesszwilling bildet das zentrale Element. Alle erforderlichen Daten werden in einem Informationsmodell des digitalen Prozesszwillings verwaltet, das Bestandteil eines Prozessmodells ist. Dies bietet den Vorteil, dass weitere Software an den vernetzten DZ angebunden werden können, ohne dass es zu Redundanzen hinsichtlich der Daten kommt.

Die separaten Schritte der initialen Absicherung der Produktion, die Produktion selbst und deren Optimierung können mit dem hier diskutierten Ansatz ganzheitlich betrachtet werden. Während der Absicherung der Produktion kann das Prozessmodell benutzt werden, um die Machbarkeit der Produktion zu validieren und in der Produktion kann die Modulare Shopfloor IT den Prozess automatisch modellbasiert steuern. Die anfallenden Daten während der Produktion können im Nachgang für die Optimierung der Produktion genutzt werden. Die automatisierte Verknüpfung und Steuerung von unterschiedlichen Simulationssystemen ist mithilfe des Prozessmodells und der Modularen Shopfloor IT vorstellbar.

Literatur

- Barlas, P.; Heavey, C.: KE tool: An open source software for automated input data in Discrete Event Simulation projects. In: Roeder, T.; Frazier, P.; Szechtman, R.; Zhou, E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference (WSC). Arlington (USA), 11.-14. Dezember 2016, S. 472–483.
- Beier, G.; Dammerau, T.; Figge, A.; Stark, R.: ISYPROM - Prozess- und Systemgestaltung für die Innovationbeschleunigung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 6, S. 389–390.
- Fischer, J.; Willers, R.; Sinnwell, C.: Materialflusssimulation für die CTPS Entwicklung. In: Eigner, M.; Koch, W.; Muggeo, C. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 131–140.

Fraunhofer IPK: Prozessassistent.

- https://www.ipk.fraunhofer.de/content/dam/ipk/IPK_Hauptseite/dokumente/themenblaetter/um-themenblatt-prozessassistent-web.pdf, letzter Zugriff 26.07.2022.
- Fraunhofer IPK: MO²GO Unternehmensdesign, Analyse und Betrieb. https://www.ipk.fraunhofer.de/content/dam/ipk/IPK_Hauptseite/dokumente/themenblaetter/um-themenblatt-moogo-web.pdf, letzter Zugriff 19.02.2023.
- Glodde, I.; Scholz, H.; Knothe, T.; Kohl, H.: Technologieintegrierte Fabrikplanung für KMU. *Werkstattstechnik* 110 (2020) 4, S. 189–194.
- Herbert, M.; Selmaier, A.; Mühlmann, F.; Fürst, J.; Franke, J.: Application of discrete-event simulation for factory planning. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021: A case study*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 133–142.
- Hernandez Morales, R.: *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2002.
- Kohl, H.; Buß, D.; Gebauer, H.; Glawar, R.; Heller, T.; Klan, S.; Knothe, T.; Sai, B.; Schmidtke, N.; Stenzel, F.; Werner, M.; Wilms, M.: *White Paper »RESYST«: Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest*. München: Fraunhofer-Gesellschaft e. V. 2021.
- Krause, F.; Tang, T.; Ahle, U.: iViP: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung. Abschlussbericht Juni 2002.
- Kuehner, K.J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. *Procedia CIRP* 104 (2021), S. 1227–1232.
- Lange, A.; Ihnen, D.; Knothe, T.: Blue Print Plant Model. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118 (2023) 3, S. 106–110.
- Lescher, M.: *Automatisierte Generierung von Arbeitsabläufen für den Service an Produktionssystemen*. Aachen: Shaker 2008.
- Milde, M.; Reinhart, G.: Automated Model Development and Parametrization of Material Flow Simulations. In: *Proceedings of 2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, National Harbor Maryland (USA), 08.-12. Dezember 2019, S. 2166–2177.
- Morshedzadeh, I.; Oscarsson, J.; Ng, A.; Aslam, T.; Frantzen, M.: Multi-level management of discrete event simulation models in a product lifecycle management framework. *Procedia Manufacturing* 25 (2018), S. 74–81.
- Neuburger, R.: Der Wandel der Arbeitswelt in einer Industrie 4.0. In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019, S. 589–608.
- Pöge, C.; Meyer, T.: Die Materialflusssimulation im Kontext eines Produktlebenszyklusmanagements. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 247–256.
- Riedelsheimer, T.; Gogineni, S.; Stark, R.: Methodology to develop Digital Twins for energy efficient customizable IoT-Products. *Procedia CIRP* 98 (2021), S. 258–263.
- Skoogh, A.; Johansson, B.; Stahre, J.: Automated input data management: evaluation of a concept for reduced time consumption in discrete event simulation. *SIMULATION* 88 (2012) 11, S. 1279–1293.
- Smith, C.: *The Programmatic Generation of Discrete-Event Simulation Models from Production Tracking Data*. Provo: Brigham Young University 2015.

- Spur, G.; Mertins, K.; Jochem, R.: Integrierte Unternehmensmodellierung. Berlin, Wien u.a.: Beuth Verlag 1993.
- Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.; Wartzack, S.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020), S. 47–50.
- Torka, J.; Lange, A.; Scholz, J.-A.; Knothe, T.; Buße, D.: Model-based process generation for supporting agile shop floor management in SMEs. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021), 2021, S. 546–556.
- VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen 2014.
- Westkämper, E.: Struktureller Wandel durch Megatrends. In: Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 7–10.
- Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulationsbasierte Untersuchung von Abstraktionsgraden im Kontext Digitaler Zwillinge für innerbetriebliche Transportsysteme

Simulation-based Analysis of Abstraction Degrees in the Context of Digital Twins for Intralogistics Transport Systems

Florian Schmid, Stefan Galka, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg (Germany), florian.schmid@oth-regensburg.de, stefan.galka@oth-regensburg.de

Minja Marinković, Sebastian Meißner, Hochschule Landshut, Landshut (Germany), minja.marinkovic@haw-landshut.de, sebastian.meissner@haw-landshut.de

Abstract: Current challenges in the planning and control of internal logistics systems are based on permanent changes in the requirements on the system, e.g., due to fluctuating order numbers or changes in their structure. For the representation and planning of in-house logistics processes, digital twins offer the possibility to verify different operational decisions such as predictive workforce scheduling. In this context, the quality of the results and their in-time presentation plays a decisive role. However, both target criteria are influenced by the detail-level of the digital representation. Based on a case study, this paper investigates the influence of the level of detail on the simulation runtime and result divergence to provide an evaluation for detail levels in the modelling of intralogistic transport systems.

1 Simulationsmodelle im Kontext Digitaler Zwillinge in der Intralogistik

In vielen Bereichen wird der Einsatz von Digitalen Zwillingen diskutiert. Die Einsatzszenarien für einen Digitalen Zwilling reichen von einer Speicherung und Analyse der Daten, einer Visualisierung des Systems, bis hin zu entscheidungsunterstützenden Systemen. Die Subsummierung der Vielzahl an unterschiedlichen Aufgabenstellungen unter dem Begriff Digitaler Zwilling führt zu zahlreichen Definitionen in der Literatur (Eramo et al. 2021; Jones et al. 2020; Tomczyk und Valk 2022). Entsprechend der ISO-Norm 23247-1(2021) ist ein Digitaler Zwilling definiert als zweckmäßige digitale Darstellung eines beobachtbaren Elements mit Synchronisation zwischen dem Element und seiner

digitalen Darstellung. Die Zweckmäßigkeit der Abbildung wird hierbei vom eigentlichen Anwendungsfall und der Zielsetzung des Digitalen Zwillings beeinflusst.

Im Bereich der Intralogistik stellen innerbetriebliche Transportsysteme einen interessanten Anwendungsfall für Digitale Zwillinge dar. Aufgrund unterschiedlicher alternativer Transportmittel und -wege sowie einer Vielzahl an Wechselwirkungen mit vor- und nachgelagerten Prozessen, wie z. B. Lager-, Kommissionier- und Produktionsprozessen, sind diese Systeme von einer hohen Komplexität geprägt. Das ganzheitliche Systemverhalten mit den Wechselwirkungen zwischen den relevanten Elementen lässt sich durch den Einsatz von Simulationsmodellen abbilden (vgl. Kühn 2006). Simulationsmodelle bieten die Möglichkeit die Planung und Steuerung von innerbetrieblichen Transportsystemen zu unterstützen. Beispielhafte Anwendungsfelder von Simulationen sind hierbei die Leistungsermittlung von Lager- und Fördermitteln oder die Dimensionierung des Transportsystems (Mestiri und Fottner, 2022, Ten Hompel et al. 2018, Eley 2012). Im Anwendungsgebiet der Steuerung intralogistischer Systeme hingegen ermöglichen Simulationen eine Entscheidungsunterstützung zur Disposition von Aufträgen, Ressourcen und des Personals (Wenzel 2018).

Für die Unterstützung bei der Steuerung des Systems müssen nicht selten Daten aus IT-Systemen oder Echtzeitsensordaten zusammengeführt und ausgewertet werden. Erfolgt diese Datensynchronisation zwischen dem realen System und dem digitalen Modell automatisiert, sind die beiden Kriterien eines Digitalen Zwillings, digitale Repräsentation des physischen Objekts und dessen Synchronisation, erfüllt, wobei das Simulationsmodell als Kontrollinstanz des realen Transportsystems fungiert (vgl. Kritzinger et al. 2018). Dementsprechend kann in diesem Kontext die Definition von Kuehner herangezogen werden: *“A Digital Twin is a virtual representation of its physical counterpart. Its components provide the basis for a simulation or are simulation models themselves. The Digital Twin has an automated bidirectional data connection with the represented physical counterpart. This connection may span across several life phases of the system.”* (Kuehner et al. 2021)

Soll der Digitale Zwilling operative Entscheidungen unterstützen, müssen wesentliche Entscheidungsgrößen fristgerecht aufgezeigt werden. Die Laufzeit des Modells korreliert jedoch in der Regel mit dem Detaillierungsgrad in der Systemmodellierung. (Vasudevan et al. 2014; Fowler und Rose 2004). Aufgrund der Komplexität von innerbetrieblichen Transportsystemen muss ein geeigneter Detaillierungsgrad für die digitale Abbildung des realen Systems gefunden werden, der die notwendige Ergebnisqualität sicherstellt. So führt ein hohes Detailniveau in der Regel zu genaueren Ergebnissen, während eine niedrige Detailgenauigkeit zu ungeeigneten Resultaten führen kann (Holtewert et al. 2014). Im Fokus dieses Beitrags liegt daher die Evaluation eines geeigneten Detaillierungsgrades für Simulationsmodelle von innerbetrieblichen Transportsystemen, die im Rahmen von Entscheidungsunterstützenden Systemen (Digitaler Zwilling) eingesetzt werden sollen. Hierfür wurden generische Modellbausteine in unterschiedlichen Detaillierungsstufen entwickelt. Mit diesen kann das innerbetriebliche Transportsystem in verschiedenen Genauigkeiten abgebildet und die Unterschiede in den Simulationsergebnissen und den Rechenzeiten untersucht werden.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Als eine der größten Herausforderungen im Bereich der Simulation wird von Fowler und Rose die Komplexität der Modelle und in diesem Zusammenhang die Dauer der Modellbildung und Simulation genannt (Fowler und Rose 2004). Die Problematik wird von Brooks weiter vertieft. Nach Brooks ist die Beziehung zwischen Modelperformance und Detailgenauigkeit wenig bekannt und die Wechselwirkung der beiden Faktoren bedarf weiterer Untersuchungen - so würde ein niedrigerer Detailgrad ebenso zielführend sein, da ab einem gewissen Punkt der Mehrwert zusätzlicher Details auf die Genauigkeit der Resultate abnimmt (Brooks 2010).

Holtewert beschreibt diesen Aspekt mit Blick auf den Nutzen und Aufwand bei der Erstellung von unterschiedlich detaillierten Simulationsmodellen. Mit steigenden Detaillierungsgrad würde der Aufwand und dementsprechend die Kosten des Simulationsprojekts überproportional zunehmen, während für den Nutzer nicht unbedingt ein Mehrwert generiert wird (Holtewert et al. 2014). Dass eine möglichst detaillierte Abbildung des Systems nicht sinnvoll ist, wird ebenfalls in der VDI 3633-1 beschrieben. Stattdessen sollte bei der Modellierung die Möglichkeit bestehen einzelne Bereiche des Systems mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abzubilden (VDI 3633-1 2014).

Dieser Ansatz wird beispielsweise von Nachtigall et al. angewandt. In seinem Beitrag werden Simulationsmodelle eines Eisenbahnstreckenabschnitts mit steigender detailtreue in der Topografie und den zulässigen Geschwindigkeitsprofilen analysiert. Im Vergleich zum realen System zeigt sich, dass eine höhere Detailgenauigkeit in den topographischen Daten kaum Einfluss auf die Genauigkeit der simulierten Fahrzeit im Vergleich zur Realität hat. Die höhere Detaillierung des Geschwindigkeitsprofils hingegen führt zu genaueren Simulationsergebnissen, weswegen in diesem Fall die Topografie weitestgehend vernachlässigt werden kann (Nachtigall et al. 2021).

Der Ansatz von Nachtigall et. al beruht hierbei auf der modularen Modellbildung, die mehrere Vorteile bieten kann. Nach Jones besteht zum Beispiel die Möglichkeit, Modelle miteinander vergleichen zu können, indem Teilmodelle einer identischen Systemkomponente ausgetauscht werden. Durch die Modularisierung erhöht sich zudem die Flexibilität bei der Modellpflege, da lediglich einzelne Komponenten überarbeitet werden müssen (Jones et al. 2001).

Im Kontext der Intralogistik stellt sich hierbei jedoch eine Problematik ein, da aufgrund unterschiedlichster Varianten des Transportsystems und der verknüpften Teilprozesse, Simulationsstudien in der Regel projektspezifisch sind. Einen generischen Ansatz hierfür stellt Staab et al. vor. Hierin werden relevante Elemente eines Routenzug Transportsystems wie Kreuzungen, Haltestellen sowie Be- und Entladestellen als eigenständige Simulationsbausteine modelliert. Durch die Verknüpfung der Bausteine über definierte Schnittstellen können schließlich verschiedene Systemausprägungen modelliert werden (Staab et al. 2013).

Generell lässt sich aus der Literatur ableiten, dass die Bestimmung eines zweckmäßigen Abstraktionsgrades eine zentrale Herausforderung darstellt (vgl. Fowler und Rose 2004.; Brooks 2010; Vasudevan und Devikar 2011). Die modulare Modellbildung nach Staab et al. bietet in diesem Kontext einen Lösungsansatz an, da durch den Vergleich von Modellen mit unterschiedlich detaillierten Bausteinen, ein geeigneter Detaillierungsgrad für das System bestimmt werden kann.

3 Modellbeschreibung

Im Forschungsprojekt „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) werden Konzepte für den Einsatz von Digitalen Zwillingen erforscht. Die Digitalen Zwillinge weisen dabei die von Marinković beschriebene Systemarchitektur auf und sollen operative Entscheidungen wie beispielsweise die vorausschauende Personaleinsatzplanung unterstützen (Marinković et al., 2023).

In den Anwendungsfällen des Forschungsprojekts werden unterschiedliche Transportsysteme betrachtet. Daher wird bei der Modellierung der von Staab et al. beschriebene Ansatz genutzt und relevante Systemelemente als generische Simulationsbausteine abgebildet. Zur Definition dieser Bausteine werden die Elemente des Transportsystems nach Tabelle 1 gegliedert. Hierfür werden sie einer der Gruppen Wegenetz, Funktionsbaustein oder Ressource zugeordnet. In der Modellierung der Bausteine werden schließlich die relevanten Funktionen und Logiken abgebildet. Dies kann in unterschiedlichen Detaillierungsgraden erfolgen.

Tabelle 1: Kategorisierung der Simulationsbausteine

Wegenetz	Funktionsbausteine	Ressourcen
Kreuzungen	Lagerzonen	Gabelstapler
Wege	Bereitstellungsflächen	Fahrerlose Transportfahrzeuge
Warteanlagen	Versandspuren	Routenzüge
Haltestellen	Pufferzonen	Personal

Im Kontext dieses Beitrags wird der Detaillierungsgrad von Simulationsbausteinen für Lagerzonen untersucht. Die Simulationsbausteine lassen sich hierbei in Block- und Regallager differenzieren. Als Bewertungsgrundlage wird die Spielzeit für die Durchführung von Transportaufträgen herangezogen.

Die Spielzeit bildet sich hierbei aus der Summe der Zeitanteile für die Fahrt auf dem Wegenetz, der Verfahrzeit innerhalb einer Lagerzone und dem Zeitbedarf für die Aufnahme bzw. Abgabe eines Transportguts. Die Simulationsbausteine dienen in diesem Zusammenhang der Abbildung der Verfahrzeit. Sie entspricht dem Zeitbedarf für die horizontale Fahrt und der Hubbewegung eines Transportmittels vom Gassen- bzw. Spuranfang bis zum Stellplatz des Transportguts und zurück.

Im Rahmen des Beitrags werden vier Detaillierungsstufen der Simulationsbausteine untersucht. In der ersten Detaillierungsstufe (S1) erfolgt eine stellplatzgenaue Abbildung. Der Gabelstapler fährt den im Auftrag vorgegebenen Lagerplatz an. Dabei werden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in der Horizontalen und Vertikalen berücksichtigt.

Bei der zweiten Detaillierungsstufe (S2) werden im Rahmen der Initialisierung des Simulationsmodells die Fahrzeiten für alle Stellplätze einer Gasse berechnet und in einer Tabelle gespeichert. Bei der Berechnung der Fahrzeit wird zwischen einer Standardfahrrampe, bei der das Fahrzeug seine maximale Geschwindigkeit erreicht, und einer Dreiecksfahrt, bei der die volle Geschwindigkeit nicht erreicht wird, unterschieden. Während der Simulation wird die Fahrt zur Lagergasse analog zu der Detaillierungsstufe S1 abgebildet. Für die Fahrzeit innerhalb der Gasse wird zufällig eine der vorab berechneten Verfahrzeiten ausgewählt.

In der dritten Detaillierungsstufe (S3) werden die Fahrzeiten entsprechend des dargestellten Ansatzes der zweiten Detaillierungsstufe bestimmt. Der Unterschied zur zweiten Stufe besteht darin, dass vier Gassen bzw. zehn Spuren zu einer Zone zusammengefasst und durch einen einzelnen Simulationsbaustein repräsentiert werden. Dies beeinflusst auch das übergeordnete Wegenetz im Simulationsmodell, da der Fahrweg bis zu jeder einzelnen Gasse/Spur abgebildet werden muss.

Eine rein analytische Betrachtung der Spielzeiten steht im Mittelpunkt der vierten Detaillierungsstufe (S4). Im Rahmen der Modellinitialisierung werden analog zu Stufe 2 die Fahrzeiten innerhalb der Gasse berechnet. Für das Wegenetz, welches die einzelnen Gassen miteinander verbindet, wird zuerst eine Entfernungsmatrix erzeugt, die die Distanzen zwischen allen Lagergassen/Spuren und Funktionsflächen enthält. Diese wird in einem zweiten Schritt in eine Transportzeitmatrix überführt. Im Rahmen der eigentlichen Simulation werden für alle Transportaufträge die Spielzeiten berechnet. Weiterhin wird auch die notwendige Zeit für die Leerfahrt betrachtet, die sich durch die Fahrt vom letzten Abgabepunkt zum nächsten Aufnahmeort eines Transportgutes ergibt. Die Zeit für die Leerfahrt wird ebenfalls mithilfe der Transportzeitmatrix berechnet. Zur Übersicht sind in Tabelle 2 die Eigenschaften der Simulationsbausteine nochmals zusammengefasst.

Tabelle 2: Eigenschaften der Detaillierungsstufen

	Stufe 1 (S1)	Stufe 2 (S2)	Stufe 3 (S3)	Stufe 4 (S4)
Abbildungsniveau	Stellplatzgenau	Gassengenau	Zonengenau	Analytische Berechnung
Belegungssituation	Wird berücksichtigt	Nicht abgebildet	Nicht abgebildet	Nicht abgebildet
Lagerstrategie	Chaotisch	Chaotisch	Chaotisch	Chaotisch
Zugriffsverteilung	gleichverteilt	gleichverteilt	gleichverteilt	gleichverteilt
Verfahrwege in der Gasse / Spur	Abbildung der Verfahrwege	Berechnung	Berechnung	Berechnung

Um den Einfluss der Lagergröße auf Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Detaillierungsstufe zu untersuchen, wurden für jeden Lagertyp drei unterschiedlich große Lagersysteme definiert. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Lagerkennwerte zusammengefasst.

Tabelle 3: Systemgrößen der Lagertypen

	Blocklager (B)	Regallager (R)
(K) System 1 (klein)	40 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	8 Gassen ca. 10.000 Stellplätze
(M) System 2 (mittel)	100 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	18 Gassen ca. 23.000 Stellplätze
(G) System 2 (groß)	200 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	38 Gassen ca. 49.000 Stellplätze

Für die Untersuchung wurden die Simulationsbausteine der jeweiligen Lagerbereiche in den vier Detaillierungsstufen mit Hilfe der Software Technomatix Plant Simulation erstellt. Neben den Lagerbausteinen umfasst jedes Modell ein Wegenetz. Über repräsentative Wegpunkte werden die Lagerbausteine und die Auf- bzw. Abgabestationen (Funktionsflächen) mit dem Wegenetz verbunden. In Abbildung 1 ist exemplarisch das Modell des Blocklagers (Systemgröße K) in den Detaillierungsstufen eins bis drei dargestellt.

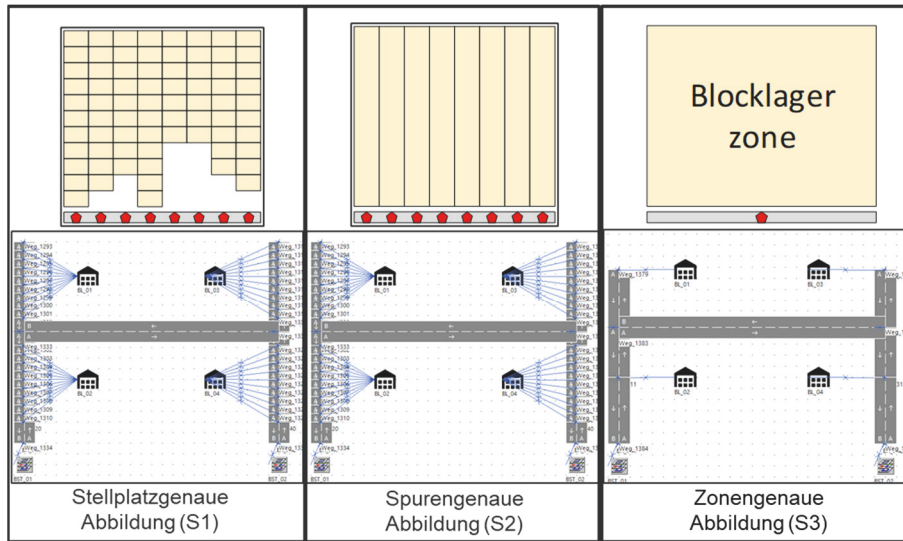


Abbildung 1: Modell des Blocklagers (Systemgröße K) in den Detaillierungsstufen S1, S2 und S3

Neben den Strukturdaten werden für die Simulation auch Lastdaten benötigt. Im Kontext des Beitrags werden darunter Transportaufträge verstanden. Hierfür müssen Transportaufträge definierte Informationen beinhalten. Grundlegend sind eine eindeutige Identifikationsbezeichnung sowie eine Quelle-Senke-Beziehung. Auf Fälligkeits- bzw. Freigabeterminen wurde im Rahmen der Untersuchung verzichtet, da lediglich die Spielzeit der Aufträge betrachtet wird. Je nach Detaillierungsgrad ist jedoch eine Spezifizierung der Auftragsdaten nötig. So muss für die erste und vierte Detaillierungsstufe eine eindeutige Lagerplatzzuordnung vorliegen. In der zweiten Stufe kann eine Datenreduktion der Stellplätze zu Spuren bzw. Gassen erfolgen. Für die dritte Detaillierungsstufe müssen hingegen Zonen gebildet werden. Abhängig vom Detaillierungsgrad der bestimmt wird, würde dies somit ebenfalls einen Mehraufwand in der Datenvorbereitung der Lastdaten für die Digitalen Zwillinge bedeuten.

4 Experimente und Resultate

In den Simulationsexperimenten wurde der Einfluss der Systemgröße und Detaillierung auf die Ergebniskennwerte untersucht, wobei jeweils das Modell in der

detailliertesten Darstellung (Stufe 1) als Referenz genutzt wird. Für die Untersuchung wurden 24 Experimente mit jeweils 10 Replikationen durchgeführt. In den ersten zwölf Experimenten wird das Regallager (R) in den drei beschriebenen Systemgrößen (K, M, F) und in den vier unterschiedlichen Detaillierungsgraden (S1, S2, S3, S4) simuliert. In den weiteren 12 Experimenten wird das Blocklager (B) untersucht. Für jede Systemgröße wurden 10 Datensätze mit je 10.000 Transportaufträgen generiert. Die Datensätze wurden für sämtliche Detaillierungsstufen eingesetzt. Jeder Datensatz enthält Ein- und Auslagerungen, wobei von einer chaotischen Lagerplatzvergabe ausgegangen wird. Die nachfolgend dargestellten Ergebniswerte stellen den Mittelwert über alle Replikationen dar.

In einer ersten Betrachtung werden die resultierenden Auftragsspielzeiten in Relation mit der Systemgröße (K, M, G) betrachtet. Es zeigt sich, wie in Tabelle 4 dargestellt, dass die Auftragsspielzeiten aufgrund der größeren Wegdistanzen proportional mit der Größe des Systems steigen. Der proportionale Anstieg ist hierbei unabhängig vom Lagertyp in sämtlichen Detaillierungsgraden erkennbar.

Für den Detaillierungsgrad lässt sich ein ähnliches Verhalten beobachten. In der vierten Detaillierungsstufe entstehen stets die höchsten Abweichungen von der Referenzspielzeit. In der zweiten und dritten Detaillierungsstufe treten hingegen geringere Abweichungen auf. Die Unterschiede zwischen den Stufen S2 und S3 sind allerdings nur geringfügig und lassen sich auf die ungenauere Abbildung der Fahrt auf dem übergeordneten Wegenetz zurückführen. In der ersten und zweiten Detaillierungsstufe ist hingegen das übergeordnete Wegenetz identisch. Folglich resultieren hier die Abweichungen lediglich auf der Abbildungsgenauigkeit der Lagergassen bzw. Blocklagerspuren.

Tabelle 4: Resultierende Spielzeiten in Sekunden (Mittelwert über alle Replikationen)

Lagertyp	Systemgröße	S1 (sek.)	S2 (sek.)	S3 (sek.)	S4 (sek.)
R	K	98,32 (ref.)	93,20 (-5,21%)	93,11 (-5,30%)	92,17 (-6,25%)
	M	106,12 (ref.)	101,08 (-4,75%)	101,32 (-4,52%)	100,19 (-5,59%)
	G	113,68 (ref.)	113,50 (-0,15%)	112,86 (-0,72%)	112,15 (-1,35%)
B	K	42,62 (ref.)	42,79 (+0,42%)	42,75 (+0,34%)	43,51 (+2,14%)
	M	45,38 (ref.)	46,64 (+2,79%)	46,70 (+2,90)	47,37 (+4,39%)
	G	48,8 (ref.)	50,24 (+2,95%)	50,31 (+3,11%)	50,94 (+4,37%)

Für die Laufzeitbetrachtung wurde die Simulationslaufzeit bis zum Abschluss des letzten Transportauftrags herangezogen. Die Dauer der Modellinitialisierung wurde hierbei nicht miteinbezogen.

Wie in Tabelle 5 dargestellt, treten unabhängig von der Systemgröße mit absteigendem Detaillierungsgrad geringere Laufzeiten auf. Das jeweilige Minimum wird in der vierten Detaillierungsstufe erreicht. Es zeigt sich, dass zwar die Laufzeit

mit der Systemgröße korreliert, doch mit steigender Systemgröße tritt bei niedrigeren Detaillierungsgraden eine höhere Reduktion der Laufzeiten auf. Eine Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Berechnungszeit eintretender Ereignisse während des Simulationslaufs. In größeren Simulationsmodellen ist die Anzahl an Ereignissen, die berechnet werden müssen und somit die Rechenzeit höher. Wird das Modell in niedrigeren Detaillierungsgraden abgebildet, treten jedoch im Vergleich weniger Ereignisse auf, wodurch sich kürzere Berechnungszeiten ergeben.

Tabelle 5: Resultierende Laufzeiten in Sekunden (Mittelwert über alle Replikationen)

Lagertyp	Systemgröße	S1	S2	S3	S4
R	K	33,95 (ref.)	29,55 (-12,94%)	29,01 (-14,55%)	21,78 (-35,84%)
	M	36,01 (ref.)	31,27 (-13,37%)	29,12 (-19,33%)	22,36 (-38,05%)
	G	41,19 (ref.)	35,19 (-14,56%)	30,22 (-26,63%)	23,20 (-43,67%)
B	K	39,20 (ref.)	38,74 (-1,17%)	33,99 (-13,27%)	24,47 (-37,56%)
	M	44,65 (ref.)	40,39 (-9,58%)	34,12 (-23,59%)	24,7 (-44,70%)
	G	50,72 (ref.)	47,45 (-6,44%)	36,48,90 (-28,07%)	24,66 (-51,37%)

Es zeigt sich, dass abhängig vom Lagertyp, der Systemgröße und des Detaillierungsgrades unterschiedliche Lauf- und Spielzeiten erreicht werden. In der vierten Detaillierungsstufe werden zwar die geringsten Laufzeiten erzielt, allerdings resultieren hier auch die höchsten Abweichungen von der Referenzspielzeit. Die zweite und dritte Stufe weisen hingegen sowohl beim Block- als auch beim Regallager ähnliche Resultate auf. Hierbei werden zwar in der zweiten im Schnitt genauere Ergebnisse erzielt, doch die dritte Stufe führt zu geringeren Laufzeiten.

In Anbetracht der Resultate muss demnach ein Kompromiss getroffen werden, indem beide Aspekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die zweite Detaillierungsstufe als künftiges Abbildungsniveau für die Modellierung der weiteren Simulationsbausteine festgelegt. In diesem Detaillierungsniveau treten insgesamt die geringsten Abweichungen von der Referenzspielzeit (S1) auf und die Simulationslaufzeiten unterscheiden sich teils nur geringfügig von der dritten Detaillierungsstufe. Für die Datenvorbereitung würde dies bedeuten, dass genaue Stellplatzinformationen vernachlässigt werden können und eine Reduktion der Daten auf Spuren bzw. Gassen erfolgen kann.

5 Fazit

Bei der Entwicklung von simulationsbasierten Digitalen Zwillingen muss ein geeigneter Detaillierungsgrad für die Abbildung des realen Systems bestimmt werden. Dabei ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und Rechenzeit zu finden. Die in diesem Beitrag dargestellte Fallstudie untersucht verschiedene

Abstraktionsgrade von Lagersystemen und deren Einfluss auf die mittlere Spielzeit für Ein- und Auslagerungen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Unterschied in den Spielzeiten mehr als sechs Prozent betragen kann. Größere Unterschiede lassen sich bei den Rechenzeiten identifizieren, so konnte die benötigte Zeit für die Simulation in einzelnen Beispielen mehr als halbiert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts TwinTraSys bietet die Arbeit somit eine Basis zur Entwicklung der weiteren Simulationsbausteine. Hierbei wird eine Modellierung in der Detaillierungsstufe S2 angestrebt. Dennoch sollten weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden, da der Detaillierungsgrad auch in Wechselwirkung mit anderen Systemkomponenten befinden kann. So kann es in Lagersystemen mit einer großen Anzahl von Flurförderzeugen häufiger zu Behinderungen zwischen den Fahrzeugen kommen. Dieser Aspekt wurde im vorgestellten Fallspeispiel nicht betrachtet. Die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fahrzeugen lassen sich bei einem höheren Detaillierungsniveau besser berücksichtigen. Vor allem die Detaillierungsstufen S1 und S2 bieten sich hierfür an.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) durchgeführt. Das Projekt wird durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Verbundförderprogramms – Förderlinie Digitalisierung, Förderbereich Informations- und Kommunikationstechnik gefördert.

Literatur

- Brooks, R.J.: Complexity, Level of Detail and Model Performance. In: Robinson, S.; Brooks, R.J.; Kotiadis, K.; Zee, D.J. (Hrsg.): *Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation*, Boca Raton (USA): CRC Press 2010.
- Eley M.: *Simulation in der Logistik, Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*, Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Eramo, R.; Bordeleau, F.; Combemale, B.; Brand, M.; Wimmer, M.; Wortmann, A.: *Conceptualizing Digital Twins*. In: *IEE-Software 99*, 2021, pp. 39-46.
- Fowler W.; Rose O.: *Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems*. In: *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International* 80, 2004, pp.469-476.
- Holtewert P.; Oesterle J.; Bruns A.; Wirts H.: *Detaillierungsgrad von Simulationsmodellen*. In: *Productivity Management* 19, 2014, pp.31-34.
- ISO 23247-1. (2021a, October 1).: *Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing: Part 1: Overview and general principles (ISO 23247-1:2021)*.
- Jones, D.; Snider, C.; Nassehi, A.; Yon, J.; Hicks, B.: *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29, 2020, pp. 36-52.
- Jones, J.W.; Keating, B.A.; Porter, C.H.: *Approaches to modular model development*. In: *Agricultural Systems*, Volume 70, Issues 2-3, 2001, pp. 421-443.

- Kritzinger W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihm, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: IFAC-PapersOnLine Volume 51, Issue 11, 2018, pp.1016-1022.
- Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2006.
- Kuehner, K. J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review, In: Mourtzis, D. (Hrsg): Procedia CIRP, Volume 104, 2021, pp. 1227-1232.
- Marinkovic, M.; Galka, S.; Meißner, S.: Digital Twins for Internal Transport Systems: Use Cases, Functions, and System Architecture. IN: Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS): January 3-6, 2023, Maui, Hawaii, USA, pp. 1195-1204.
- Mestiri S.; Fottner J.: Simulationsbasierte Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme: Einsatz von ereignisdiskreter Materialflusssimulation zur Dimensionierung heterogener Transportsysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2022; 117(4): pp. 229-233.
- Nachtigal, P.; Šourek, D.; Tischer E.: Level of Detail of the Simulation Model and its influence on the Result Accuracy. In: Gasparik, J., Zitricky, V., Bartuska, L. (Hrsg.): Transportation Research Procedia Volume 53, Zilina (Slovakia), 22-24. April 2021, pp. 91-97.
- Staab, T.; Galka, S.; Klenk, E.; Günther, W.A.: Effizienzsteigerung für Routenzüge – Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität, IN: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A.; (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik, Paderborn, 2013.
- Ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme-Förder- und Lagertechnik, Berlin, Heidelberg: Springer 2018.
- Tomczyk, M.; Valk, H.: Digital Twin Paradigm Shift: The Journey of the Digital Twin Definition. In: Filipe, J.; Smialek, M.; Brodsky, A.; Hammoudi, S. (Hrsg.): Proceedings of the 24th International Conference on Enterprise Information Systems, Volume 2 (ICEIS), Online, 25-27. April 2022, pp.90-97.
- Vasudevan K.; Devikar A.: Selecting Simulation abstraction levels in Simulation models of complex manufacturing systems. In: Jain S.; Creasey R.R.; Himmelspace, J.; White, K.P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix (USA), 11.-14. Dezember 2011, pp. 2273-2282.
- VDI 3633-1 (2014, Dezember): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Blatt 1: Grundlagen (VDI 3633-1:2014).
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg): Modellierung logistischer Systeme, Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Integration von Simulation und Reinforcement Learning zur Portalrobotersteuerung

Integration of Simulation and Reinforcement Learning for Gantry Robot Control

Robert Miltenberger, Horst Zisgen, Hochschule Darmstadt, Darmstadt (Germany),
robert.miltenberger@h-da.de, horst.zisgen@h-da.de

Markus Hochhaus, Jürgen Schmidpott, SimPlan AG, Hanau (Germany),
markus.hochhaus@simplan.de, juergen.schmidpott@simplan.de

Boris Bind, Fibro Läßle Technology GmbH, Hassmersheim (Germany),
b.bind@fibro-laepple.de

Abstract: Industry 4.0 brings on one side a lot of new opportunities and on the other side numerous challenges, e.g. the autonomous interaction of machines and transportation vehicles. Simulation combined with methods of the Artificial Intelligence (AI), like reinforcement learning (RL), are a cornerstone of the enablement of this required autonomy. This paper deals with the cooperation of simulation and RL in order to enable an autonomous control of gantry robots. It presents an adequate architecture for the interaction of simulation and RL-agents and discusses the specific requirements this interaction has to meet in order to get RL-agents trained in the context of gantry robot control. Further, trained RL-agents, and their performance in different settings are presented.

1 Motivation und Problemstellung

Im Zuge von Industrie 4.0 kommen vielfältige Herausforderungen auf die Fertigungsindustrie zu, welche neue Lösungskonzepte auf der Basis von Künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen (ML) erfordern. Der Einsatz von KI- und ML-Verfahren erstreckt sich in den Szenarien zur Industrie 4.0 potentiell auf die gesamte Wertschöpfungskette in der Produktion bzw. im Unternehmen. In dem folgenden Beitrag wird aus dieser Wertschöpfungskette die Verkettung der Produktionsabläufe mittels sogenannter Portalsysteme oder Portalroboter gesondert betrachtet. In Portalsystemen fahren Laufwagen voll automatisiert horizontal längs einer Achse Maschinen zum Be- oder Entladen an. Die Be- und Entladung erfolgt über die Vertikalachsen der jeweiligen Portallaufwagen (siehe linke Grafik in Abbildung 1).

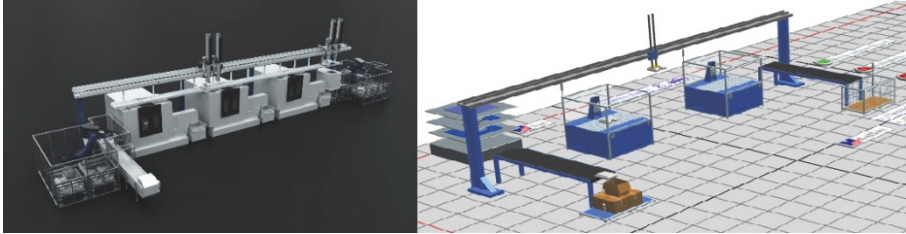


Abbildung 1: Darstellung eines Portalsystems und dessen Simulationsmodell

Dabei können mehrere Maschinen von einem Portal angefahren werden. Portale werden heute vielfach zur automatisierten Bestückung von Maschinen mit Halbfertigteilen eingesetzt. Ein Beispiel aus der Praxis ist die Fertigung der Gehäuse von Elektroantrieben für Fahrzeuge. Hier durchläuft das Bauteil verschiedenste Prozesse, wie spanende Bearbeitung, Lasermarkierung, Reinigung, Temperierung. Einige der Prozesse laufen dabei parallel, sodass das Portalsystem die Möglichkeit hätte die Sequenz zu beeinflussen. Ebenso wird auf den Anlagen meistens nicht nur ein Typ gefahren, sondern mehrere Produktvarianten mit zum Teil unterschiedlichen Prozessabläufen. Diese Komplexität sowie die zusätzlichen Herausforderungen im Zuge von Industrie 4.0 stellen heutige Steuerungskonzepte, die typischerweise auf Prioritätsregeln beruhen, vor Herausforderungen.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Integration von Simulation und Reinforcement Learning (RL) vorgestellt, um diesen Herausforderungen zu begegnen. In der Regel werden Simulationsmodelle nur zur Planung und Inbetriebnahme von Portalsystemen erstellt und genutzt (rechte Grafik in Abbildung 1). Die Nutzung solcher Simulationsmodelle im Zusammenspiel mit geeignet modellierten RL-Agenten eröffnet zusätzlich die Möglichkeit autonome Steuerungen für Portalroboter zu entwickeln, welche die gestiegenen Anforderungen erfüllen.

2 Anwendungsumfeld und Abgrenzung zu bisherigen Arbeiten

RL Ansätze im Kontext der Produktionsplanung sind schon seit längerem untersucht worden. Ein Hauptanwendungsgebiet ist das Job-Shop Scheduling. Neuere Arbeiten zur Anwendung von RL zur Reihenfolgeplanung sind unter anderem Waschneck (2018), Xie (2019) oder Lang (2020). Die klassischen Job-Shop Scheduling Probleme ermitteln die Produktionsreihenfolge ohne die Berücksichtigung eventuell benötigter Transportmittel, welche die Maschinen in der bestimmten Reihenfolge mit den Aufträgen bzw. Halbfertigteilen bestücken. Diese können aber durchaus ein limitierender Faktor in der Produktion sein. Automatische Transportsysteme spielen in der Intralogistik eine große Rolle, u.a. die sogenannten Automatic Guided Vehicles (AGV). So wurde zuletzt insbesondere die auf AGV basierende Intralogistik mit Hilfe von RL-Agenten untersucht. Einige aktuelle Beispiele dazu finden sich u.a. in Popper (2021), Xue (2018) und Feldkamp (2020). Während AGVs sich typischerweise nur auf vordefinierten Routen bewegen können, bilden die sogenannten Autonomous Mobile Robots (AMR) eine Klasse von automatischen Transportsystemen, welche flexibel durch die Fertigung navigieren können (siehe z.B. Fragapane (2021)). Auch

dazu finden sich in der Literatur Ansätze, welche die Steuerung von AMR mit Hilfe von RL umsetzen. Ein aktuelles Beispiel findet sich etwa in Malus (2020).

Steuerungsalgorithmen für Portalsysteme auf der Basis von RL-Agenten sind noch nicht umfangreich untersucht worden. Die Autoren konnten dazu im Wesentlichen nur die drei inhaltlich sehr ähnlichen Arbeiten der Forschergruppe um Xinyan Ou und Qing Chang finden. In Ou (2018) findet sich ein Ansatz, der auf klassischem Q-Learning auf der Basis von Q-Tabellen beruht, was den Einsatzbereich des Ansatzes auf kleine Problemräume einschränkt. Die Arbeiten Ou (2019) und Ou (2020) sind Modifikationen von Ou (2018) und basieren ebenfalls auf klassischem Q-Learning.

Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz nutzt im Gegensatz dazu einen Deep Learning (DQN) Ansatz, siehe Mnih (2015), welcher die Einsatzmöglichkeiten aufgrund der besseren „computational efficiency“ deutlich erweitert.

Eine gute Übersicht über die aktuellen Arbeiten und Entwicklungen hinsichtlich des Einsatzes von RL im Produktionssteuerungskontext findet sich in Panzer (2021).

Hinsichtlich der Integration von Simulation und RL im Kontext der Produktionssteuerung gibt es in der neueren Zeit einige Ansätze mit konzeptionellen Vorschlägen. Ein solcher Ansatz wird in Rinciog (2021) beschrieben. Dort werden Anforderungen für ein Simulations-Framework für das Benchmarking von RL im Kontext der Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung stochastischer Einflussfaktoren beschrieben, die in die Implementierung von FABRICATIO-RL eingeflossen sind. In Kuhnle (2020) wird mit SimPyRLFab eine Software-Bibliothek beschrieben, die ebenfalls Simulation und RL koppelt. Beide Ansätze beziehen sich, wie auch die oben beschriebene Literatur zum Einsatz von RL-Agenten, rein auf die Reihenfolgeplanung, ohne die gegebenenfalls benötigten Transportmitteln zu berücksichtigen. Vergleichbare Ansätze, die Transportmittel oder Portale berücksichtigen, sind den Autoren nicht bekannt.

3 Interface und Simulation

3.1 Interface

Das in der Arbeit verwendete Verfahren besteht mit RL-Agent, Schnittstelle und Simulator aus drei Teilsystemen. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt.

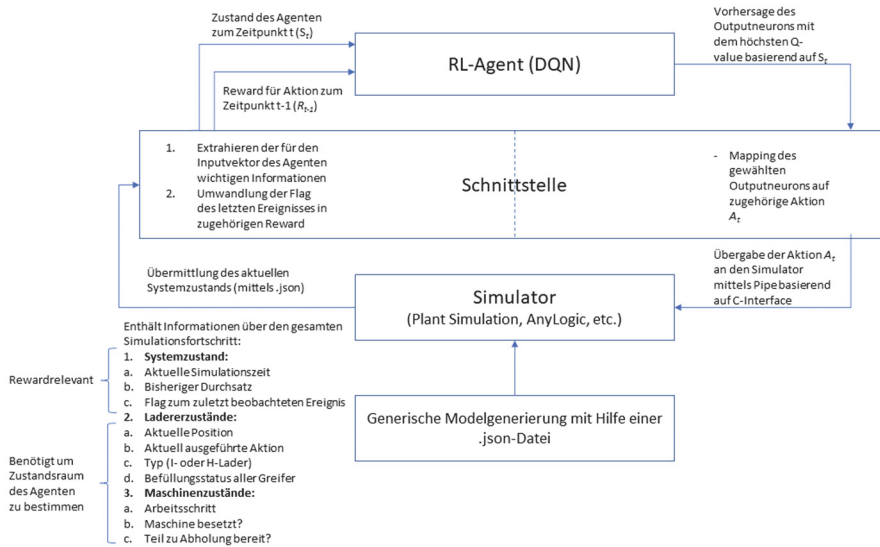


Abbildung 2: Kommunikation zwischen RL-Agent und Simulation

Der RL-Agent ist in Python entwickelt und wird in Kapitel 4 näher beschrieben. Auf der anderen Seite wurde die Trainingsumgebung für den RL-Agenten mit zwei Materialflusssimulatoren aufgebaut (Plant Simulation und AnyLogic). Damit sollte der modulare Aufbau getestet werden. Für die vorliegende Arbeit wurde Plant Simulation als Simulator verwendet. Damit der RL-Agent mit der Simulationsumgebung kommunizieren kann, wurde in Python eine REST-API als Schnittstelle entwickelt.

Zum Training eines neuen RL-Agenten startet die Schnittstelle den Simulator. Dies geschieht über einen Kommandozeilenaufruf. Durch diesen Aufruf wird zusätzlich die Adresse für zukünftige REST-Requests gesetzt. Bei Start des Simulators wird die Struktur der Produktionslinie über eine JSON-Datei übermittelt. Mithilfe der entwickelten Parser wird dann in der Simulation generisch die Produktionslinie aufgebaut. Außerdem werden mithilfe der JSON-Datei simulationsspezifische Parameter, wie die Simulationsdauer und der Random-Seed übergeben.

Über die JSON-Struktur kann die Anzahl und Art an Ladern, Maschinen und Produktionsprogrammen Simulator-unabhängig mit jedem Texteditor angepasst werden, ohne Änderungen am Simulationsmodell vornehmen zu müssen. Dies ermöglicht das Trainieren neuer RL-Agenten ohne Simulationserfahrung.

Beim Training wird immer, wenn sich der Zustand eines Laders oder einer Maschine verändert und das Portal so eine neue Aktion ausführen kann, über die API ein Request an den RL-Agenten gestellt und eine Aktion erwartet. Der Request-Body besteht aus einer JSON-Datei, welche aus drei Teilen zusammengesetzt ist. Der erste Teil ist der aktuelle Systemzustand, hier wird die Simulationszeit, der bisher erreichte Durchsatz und eine Bewertung der letzten Aktion übermittelt. Im zweiten Abschnitt werden die Zustände aller Lader übergeben, d.h. die Position der Lader und Informationen über die geladenen Objekte. Der letzte Teil der JSON-Datei beinhaltet

alle Informationen der Maschinen, die auch in der Realität ausgelesen werden können, z.B. ob die Maschine belegt oder defekt ist.

Der RL-Agent muss anhand dieser Informationen selbst entscheiden, welche Aktion zu treffen ist. Dabei wird der Aktionsraum automatisch aus der JSON-Datei zur Modellgenerierung bestimmt.

Als mögliche Aktionen stehen das Anfahren jeder Station, das Be- und Entladen des Greifers und Warten zur Auswahl. Der Wartebefehl wird benötigt, um ein zielloses Hin- und Herfahren zu vermeiden, falls kein Teil zur Weiterverarbeitung vorhanden ist. Um den Lernerfolg zu beschleunigen werden Aktionen, die in einem Zustand unmöglich durchführbar sind, unterdrückt. Der RL-Agent kann sich beispielsweise nicht für einen „unload“-Befehl entscheiden, wenn der Greifer unbeladen ist. Des Weiteren wird an Maschinen eine Aufnahme unterdrückt, falls kein Teil zur Abholung bereitsteht oder eine Abgabe, falls die Maschine bereits besetzt ist.

Das Interface wandelt jeden dieser Requests in den entsprechenden Input-Vektor des RL-Agenten um und übergibt den Reward aus dem letzten Schritt an den Lernalgorithmus. Nachdem der RL-Agent eine Aktion für den Eingabevektor erzielt hat, wandelt die Schnittstelle den Output-Vektor in eine Aktion um und übergibt diese an die Simulation.

Zusätzlich zur Interaktion zwischen RL-Agent und Simulation verwaltet die Schnittstelle die einzelnen Simulationsläufe, beendet diese nach der eingestellten Zeit und startet neue Läufe. Außerdem ist die Schnittstelle in der Lage, beliebig viele Läufe parallel zu verwalten, wodurch die Trainingsperformance verbessert werden kann.

3.2 Simulation

Als Simulator zum Training des RL-Agenten wird Plant Simulation 16.1 verwendet, insbesondere der „GantryLoader“-Baustein aus der Standard-Bibliothek „CranesAndMore“. Zum Aufbau des Modells wird eine JSON-Datei im oben beschriebenen Format eingelesen. Die verschiedenen angegebenen Knoten werden mit ihren Parametersets im Simulator in eine Tabelle geschrieben und anhand der übermittelten Parameter wird das Modell generisch erstellt. Dazu ist eine Mapping-Tabelle hinterlegt, um die Parameter der JSON-Datei mit den entsprechenden Attributen der Simulationsobjekte zu verknüpfen. Dadurch lassen sich das Modell und die JSON-Datei vergleichsweise einfach um zusätzliche Einstellmöglichkeiten erweitern. Einige übergebene Parameter werden direkt auf die Simulationsobjekte aufgeprägt (z.B. Lader-Geschwindigkeit und -Beschleunigung), andere Parameter werden zunächst als Tabelle auf das zugehörige Simulationsobjekt geschrieben und bei der Initialisierung des Simulationslaufs verarbeitet (z.B. die Parameter der Zwischenankunftszeitverteilung an der Quelle).

Nachdem das Modell erzeugt wurde, werden einzelne Simulationsläufe gestartet, um den RL-Agenten zu trainieren. Hierbei wird im Simulationsmodell zum Zeitpunkt der Initialisierung über die Dispositionssteuerung die erste Anfrage an den RL-Agenten gestellt, um eine Aktionsentscheidung für das Portal zu treffen. Außerdem werden weitere Anfragen der Dispositionssteuerung nach jeder ausgeführten Aktion gestellt. Gibt der RL-Agent einen Wartebefehl als Aktion zurück, so wird die nächste Anfrage nach der nächsten Zustandsänderung im System gestellt (Start oder Ende einer Störung, Ankunft eines Teils, Ende der Teilbearbeitung) oder nach Ablauf einer maximalen Wartezeit. Bei jeder Anforderung wird eine JSON-Datei mit den aktuellen

Zuständen der Stationen, Lader und Halbfertigteile sowie weiterer Simulationsinformationen (simulierte Zeit, aktueller Durchsatz) übergeben.

4 Reinforcement Learning Ansatz

RL ist ein Ansatz des ML, um Markovsche Entscheidungsprozesse (MDP) zu modellieren. Die Idee des RL ist, dass ein Agent durch Rückmeldung auf gewählte Aktionen durch sein Environment eine möglichst gute Politik π erlernt, mit der eine Aufgabe gelöst werden soll. Sei S_t der Zustand des Environments zum Zeitpunkt t und A_t die durch den RL-Agenten gewählte Aktion. Durch Ausführen der Aktion A_t im Zustand S_t liefert das Environment einen zugehörigen Reward R_{t+1} und einen Nachfolgezustand S_{t+1} . Die Politik legt dabei fest, welche Aktion in einem gegebenen Zustand zu wählen ist. Die Auswahl der Aktion basiert auf der sogenannten Q-Funktion. Diese gibt an, wie hoch die insgesamt zu erwartenden diskontierten Rewards sind, wenn der RL-Agent in S_t die Aktion A_t auswählt und anschließend weiter die Politik π verfolgt. Für eine weiterführende Einführung in RL wird auf Sutton und Barto (2018) verwiesen.

Das in diesem Paper vorgestellte Verfahren basiert auf dem sogenannten Q-Learning, wobei die Q-Funktion nicht tabellarisch gespeichert, sondern durch ein neuronales Netz, ein sogenanntes Deep-Q-Network (DQN) (siehe Mnih (2015)), approximiert wird. Die Gewichtsanpassungen des DQNs basieren auf der folgenden Fehlerfunktion

$$\theta_t \leftarrow \theta_t - \alpha \nabla_{L_t}, \text{ mit } L_t = \left(Q(S_t, A_t; \theta) - \left(R_{t+1} + \eta^{t-t'} \max_a Q(S_{t+1}, a; \theta^-) \right) \right)^2.$$

Das Training des RL-Agenten, also das Anpassen der Gewichte des DQNs, basiert auf 20.000 Trainingsepisoden á 20 Minuten simulierter Zeit. Nach diesen 20 Minuten wird das gesamte Modell zurückgesetzt und mit einem neuen Seed initialisiert. Das Training verfolgt eine ϵ -greedy Strategie. Während einer Episode werden die Tupel $(S_t, A_t, R_{t+1}, S_{t+1})$ im sogenannten Replay Memory gespeichert. Sobald die Maximalgröße von 100.000 Einträgen erreicht ist werden die ältesten Werte durch die neuen überschrieben. Am Ende jeder Episode wird eine Minibatch der Größe 64 aus dem Replay Memory gezogen, um das Netz damit zu trainieren. Der Lernerfolg wird noch erhöht, indem zusätzlich nach jeder Entscheidung mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/3 ebenfalls nach diesem Schema trainiert wird.

Off-policy Algorithmen, wie das Q-Learning, können durch die Verwendung von Approximationen divergieren. Um dem entgegen zu wirken, werden zwei DQNs, das Prediction und das Target Netzwerk, verwendet. Die Initialisierung der beiden Netzwerke erfolgt mit identischen Gewichten θ bzw. θ^- . Während des Trainings werden ausschließlich die Gewichte des Prediction Netzwerks aktualisiert. Nach C Episoden werden die Gewichte des Target Netzwerks, θ^- , mit denen des Prediction Netzes, θ , überschrieben.

Das Trainieren von RL-Agenten erfolgt über Rewards. Für die betrachteten Portalsysteme werden die Rewards auf der Basis bekannter Kenngrößen, wie dem Durchsatz der Produktionslinie, vergeben. Der RL-Agent soll das Portalsystem so steuern, dass der Durchsatz optimal ist. Dabei muss er aber eine Strategie erlernen, die über die reine Optimierung des Durchsatzes hinaus weitere Bedingungen erfüllt. So müssen etwa unnötige Fahrten, die keinen Einfluss auf den Durchsatz haben,

vermieden werden. Daher wird für die erste zweier nacheinander durchgeführter Fahraktionen ein zusätzlicher Reward von -1 verteilt, da bei zwei aufeinanderfolgenden Fahrweisungen die erste Fahrt stets obsolet ist. Auch Wartebefehle können zu langsamen Trainingserfolgen führen, da sie sehr viel der Simulationszeit in Anspruch nehmen. Durch das ϵ – greedy Lernverfahren kann es während des Trainings zu ungewollten Wartebefehlen kommen, nach welchen keine Zustandsänderung mehr auftritt und es somit zu keiner Beendigung des Wartebefehls kommt. Daher beträgt die maximale Wartezeit 45 Sekunden und nach Ablauf wird der RL-Agent erneut getriggert. Um die verlorene Zeit zu bestrafen, wird ein weiterer Diskontierungsfaktor $\eta^{t-t'}$, $0 < \eta < 1$, eingeführt. Dieser berücksichtigt die vergangene Zeit zwischen dem Zeitpunkt der letzten und der aktuellen Aktion, t' bzw. t . Dadurch werden unpassende Wartebefehle bestraft. Außerdem positioniert sich der Lader vor einem Wartebefehl bereits an der Maschine, an welcher als nächstes ein Teil zur Abholung bereit steht. Ohne diesen Diskontierungsfaktor muss der Anwender das Warten für einzelne Situationen manuell unterdrücken, um einen positiven Lerneffekt zu erzielen. Außerdem wird durch die zusätzliche Vergabe eines Rewards von $\tau_t/100$ für Be- und Entladebefehle das Lernverfahren deutlich beschleunigt. Dabei bezeichnet τ_t den erzielten Durchsatz bis zum Zeitpunkt t .

Tabelle 1: Auflistung der vergebenen Rewards

EREIGNIS	REWARD
Abgabe eines bearbeiteten Teils am Output Conveyor	+5
Korrekt an nächster Maschine abgegebenes Teil	+2
Zwei aufeinanderfolgende Fahrbefehle	-1
Lade- bzw. Entladebefehl	$\tau_t/100$
Sonst	0

5 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf ein Portalsystem mit einem Lader und einer Fertigung mit drei verschiedenen Bearbeitungsschritten. Für jeden dieser Arbeitsschritte gibt es zwei identische Bearbeitungsmaschinen. Das entsprechende Modell wird einmal ohne Zufallsfaktoren, wie Maschinenausfälle, trainiert und anschließend wird der Einfluss von Zufallsfaktoren sukzessive erhöht. Zur Bewertung der Ergebnisse werden die Produktionsdurchsätze der RL-basierten Steuerung mit den Durchsätzen, die mit der Nearest-Job-First (NJJ) Heuristik erzielt werden, verglichen. Die NJJ-Heuristik steuert den Laufwagen so, dass immer das sich ihm am nächsten befindliche Halbfertigteil für den nächsten Transport ausgewählt wird. Es werden jeweils 100 Validierungsläufe mit einer simulierten Zeit von zwei Stunden zur Schätzung des erwarteten Durchsatzes $E(D)$ und des zugehörigen 90%-Konfidenzintervalls (CI) durchgeführt.

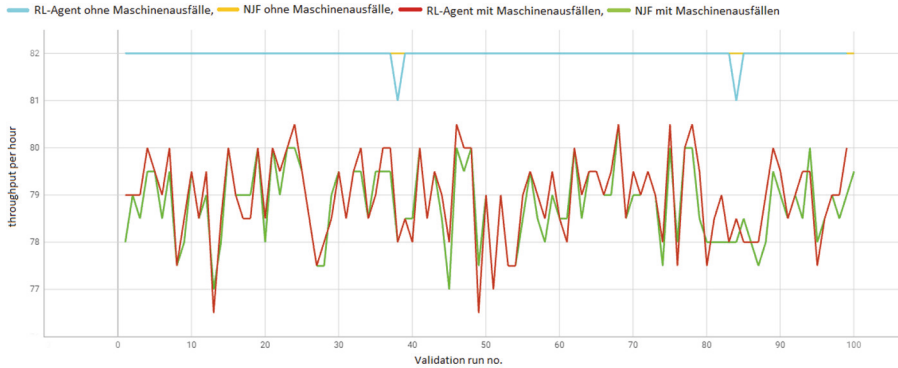


Abbildung 3: Modell mit und ohne Maschinenausfälle

Sowohl die NJF-Heuristik als auch der RL-Agent erzielen für den deterministischen Fall unter den gegebenen Modellrestriktionen den maximal möglichen Durchsatz von 82 Teilen pro Stunde (siehe Abbildung 3). Auch im Fall von Maschinenausfällen liegen die Durchsätze von RL-Agent ($E(D)=78,96$; $CI=[78,81; 79,11]$) und der NJF-Heuristik ($E(D)=78,79$, $CI=[78,66; 78,93]$) nahe beieinander.

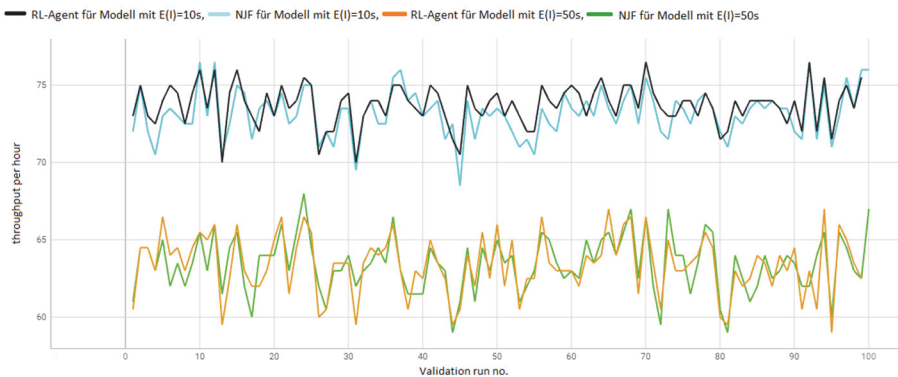


Abbildung 4: Modell mit Ausfällen von Bearbeitungsmaschinen und Input Conveyor

Abbildung 4 zeigt die erzielten Durchsätze für Modelle, in denen noch zusätzlich die Teilezulieferung durch den Input Conveyor zufällig ausfallen kann, wobei der Variationskoeffizient der Ankunftszeiten im oberen Graphenpaar geringer ausfällt als für die beiden unteren Kurven. Im ersten Fall ist stets ein Teil im System und der RL-Agent erzielt einen Durchsatz von $E(D)=73,73$ ($CI=[73,52; 73,94]$) und die NJF-Heuristik von $E(D)=73,16$ ($CI=[72,91; 73,41]$) Teilen pro Stunde. Damit ergibt sich ein kleiner, aber statistisch signifikanter Vorteil des RL-Agenten. Im Fall mit längeren Zwischenankunftszeiten erzielen RL-Agent und NJF-Heuristik mit $E(D)=63,39$ ($CI=[63,07; 63,71]$) bzw. $E(D)=63,39$ ($CI=[63,09; 63,69]$) nahezu identische Ergebnisse.

6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird durch eine Kopplung von Simulation und RL erfolgreich ein RL-Agent zur Steuerung von Portalsystemen trainiert. Die Kopplung ist so allgemein umgesetzt, dass lediglich eine Kommunikation des Simulators über REST notwendig ist, um ein Training zu starten. Sobald der Simulator an die Schnittstelle angeschlossen ist, sind weder Simulations-, RL- noch Programmierkenntnisse nötig. Der Vergleich zwischen RL-Agenten und NJF-Heuristik zeigt, dass der RL-Agent mindestens gleich gute oder ein wenig bessere Ergebnisse liefert. Dabei zeigt der RL-Agent tendenziell seine Vorteile in Modellen mit größeren zufälligen Einflüssen. Allerdings handelt es sich bei den betrachteten Modellen um sehr einfache Produktionslinien und es gilt die Güte der RL-Agenten auch auf komplexeren Produktionslinien zu testen. Dazu können beispielsweise die Bearbeitungsschritte der Produkte erhöht, mehrere Produktklassen oder andere Lader-Typen betrachtet werden. Erste Analysen für diese Fälle zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Danksagung

Das KISPo Projekt (HA Projektum. 1286/21-187) wird aus Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert.

Literatur

- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.: Simulation-based deep reinforcement learning for modular production systems. In: Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando (USA), 14-18 Dezember 2020, S. 1596–1607.
- Fragapane, G; de Koster, R; Sgarbossa, F; Strandhagen, J.O.: Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research* 2021, S. 405-426.
- Kuhnle, A.; Kaiser, J.-P.; Theiß, F.; Stricker N.; Lanza, G.: Designing an adaptive production control system using reinforcement learning. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2020, S. 1–22.
- Lang, S.; Lanzerath, N.; Behrendt, F.; Reggelin, T.; Müller, M.: Integration of deep reinforcement learning and discrete-event simulation for real-time scheduling of a flexible job shop production. In: Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando (USA), 14-18 Dezember 2020, S. 3057-3068.
- Malus, A.; Kozjek, D.; Vrabic, R.: Real-time order dispatching for a fleet of autonomous mobile robots using multi-agent reinforcement learning. *CIRP annals* (2020) 69, S. 397–400.
- Mnih, V.; Kavukcuoglu, K.; Silver, D.; Rusu, A.; Veness, J.; Bellemare, M.; Graves, A.; Riedmiller, M.; Fidjeland, A.; Ostrovski, G.; Petersen, S.; Beattie, C.; Sadik, A.; Antonoglou, I.; King, H.; Kumaran, D.; Wierstra, D.; Legg, S.; Hassabis, D.: Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature* (2015) 518, S. 529-533.

- Ou, X.; Chang, O.; Arinez, J.; Zou, J.: Gantry work cell scheduling through reinforcement learning with knowledge-guided reward setting. *IEEE Access* (2018) 6, S. 14699 – 14709.
- Ou, X.; Chang, O.; Chakraborty, N.: Simulation study on reward function of reinforcement learning in gantry work cell scheduling. *Journal of manufacturing systems* (2019) 50, S. 1–8.
- Ou, X.; Chang, O.; Chakraborty, N.: A method integrating q-learning with approximate dynamic programming for gantry work cell scheduling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2020) 18, S. 85–93.
- Panzer, M.; Bender, B.: Deep reinforcement learning in production systems: a systematic literature review. *International Journal of Production Research* (2021), S. 1–26.
- Popper, J.; Yfantis, V.; Ruskowski, M.: Simultaneous production and agv scheduling using multi-agent deep reinforcement learning. *Procedia CIRP* (2021) 104, S. 1523–1528.
- Rinciog, A.; Meyer, A.: FABRICATIO-RL: A Reinforcement Learning Simulation Framework for Production Scheduling. In: *Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference (WSC)*, Phoenix (USA), 12-15 Dezember 2021, S. 1-12.
- Sutton, R.; Barto, A.: *Reinforcement Learning: An Introduction*. The MIT Press, 2nd edition, 2018.
- Waschneck, B.; Reichstaller, A.; Belzner, L.; Altenmüller, T.; Bauernhansl, T.; Knapp, A.; Kyek, A.: Optimization of global production scheduling with deep reinforcement learning. *Procedia CIRP* (2018) 72, S. 1264–1269.
- Xie, S.; Zhang, T.; Rose, O.: Online Single Machine Scheduling Based on Simulation and Reinforcement Learning. In: *Simulation in Produktion und Logistik 2019* Matthias Putz & Andreas Schlegel (Hrsg.) *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach 2019
- Xue, T.; Zeng, P.; Yu, H.: A reinforcement learning method for multi-agv scheduling in manufacturing. In: *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Lyon (France), 20-22 Februar 2018, S. 1557–1561.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Fallbeispiele aus Produktion und Logistik für die Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining

Manufacturing and Logistics Use Cases on Combining Discrete Event Simulation and Process Mining

Sven Spieckermann, Niklas Stöhr, SimPlan AG, Hanau (Germany),
sven.spieckermann@simplan.de, niklas.stoehr@simplan.de

Gottfried Mayer, BMW AG, München (Germany), gottfried.mayer@bmw.de

Felix Özkul, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany),
felix.oezkul@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Abstract: This paper provides an overview on two approaches to combine process-mining and discrete-event simulation in manufacturing and logistics for mutual benefit. One approach focuses on generating simulation models based on process models, while the other approach utilizes process models to validate existing simulation models. Both approaches are explained on a conceptual and technical level. In addition, two real-world use cases from the field of intralogistics and from battery cell assembly are presented. Initial experiences and lessons learned from applying the approaches to the use cases are discussed. The findings illustrate the potential and the limitations of the explored combinations.

1 Einleitung

Process-Mining hat sich in den vergangenen rund zwanzig Jahren als eine Methode der datengetriebenen Prozessanalyse etabliert; ihr Einsatz ist zu einem großen Software- und Beratungsmarkt geworden (Gartner 2021). Die Methode basiert auf der Auswertung von sogenannten Ereignisprotokollen (*Eventlogs*) und deren graphischer Aufbereitung beispielsweise als DFG (*Directly-Follows Graph*), BPMN (*Business Process Model and Notation*) oder Petri-Netz (van der Aalst 2022).

Hervorgegangen ist das Process-Mining aus Entwicklungen rund um das Geschäftsprozess- und Workflow-Management (Agrawal et al. 1998; van der Aalst und Weijters 2004). Garcia et al. (2019) bestätigen die Wichtigkeit dieser Anwendungsfelder durch die Auswertung veröffentlichter Fallstudien; erkennbar ist jedoch auch, dass der Einsatz von Process-Mining zur Analyse von Produktions- und Logistikprozessen bislang eher eine Nebenrolle spielt.

Einer der Vorreiter für die Nutzung von Process-Mining im Produktionsbereich ist die BMW AG. Dort wurde schon vor einigen Jahren damit begonnen, die Methode auch in der Produktion einzusetzen (Knoll et al. 2019). So konnten zum Beispiel Erfahrungen mit der Untersuchung von Abläufen in Lackierereien gesammelt werden (Lechner 2020). Eine der großen Stärken von Process-Mining hat sich dabei bestätigt: Wenn konsistente Ereignisprotokolle vorliegen, dann können die zugrunde liegenden Prozesse – in der Produktion also die Produktionsprozesse – schnell visualisiert und analysiert werden. Eine in der Natur der Methode liegende Einschränkung gilt auch für den Produktionsbereich: Konsequenzen von Prozessveränderungen lassen sich mit Process-Mining erst abschätzen, wenn die Veränderungen tatsächlich durchgeführt worden sind, da die Methode auf Basis von Ereignisprotokollen und den daraus extrahierbaren Prozessmodellen arbeitet. Wenn diese Protokolle nur Ist-Daten aus der Produktion umfassen, dann können auch nur Ist-Prozesse bewertet werden. Zukunftsszenarien und „Was-wäre-wenn“-Fragen lassen sich nicht ohne Weiteres untersuchen.

Genau darin – in der dynamischen Analyse und Bewertung von stochastischen Zukunftsszenarien – liegt eine der Stärken der ereignisdiskreten Simulation (im Folgenden *Simulation* genannt) (Gutenschwager et al. 2017), die bei der BMW AG seit mittlerweile mehr als 25 Jahren erfolgreich im Einsatz ist (Spieckermann et al. 1997). Trotz dieser erfolgreichen Anwendungshistorie von Simulation in der Automobilindustrie bringen Simulationsanwender regelmäßig den Wunsch zum Ausdruck, dass Simulationsstudien (und hier insbesondere die Erstellung von Simulationsmodellen) schneller durchgeführt werden sollten, als das heute überwiegend noch der Fall ist (Mayer und Pöge 2013; Mayer und Mieschner 2017).

Aus diesen einleitenden Betrachtungen zu den Einsatzschwerpunkten und Potenzialen von Process-Mining und Simulation ist die Idee entstanden, die Stärken dieser beiden Methoden für Anwendungen im Bereich Produktion und Logistik zu kombinieren. Hierzu werden zunächst einige in der wissenschaftlichen Literatur beschriebene Wege zur Verknüpfung beider Methoden erläutert, bevor eigene Ansätze präsentiert werden. Danach folgt die Vorstellung von Fallbeispielen, die der Erprobung und Weiterentwicklung der Ansätze gedient haben. Neben erreichten Fortschritten sollen an diesen Beispielen auch offene Herausforderungen illustriert werden. Der Beitrag schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Verknüpfung von Simulation und Process-Mining

Erste Ansätze zur Verknüpfung von Simulation und Process-Mining wurden vor etwa 15 Jahren vorgeschlagen (Rozinat et al. 2009). Mittlerweile finden sich in der Literatur umfassende Anregungen und Konzepte, wie das Zusammenspiel der Methoden gestaltet werden kann (van der Aalst 2018; Pourbafrani und van der Aalst 2022). Ähnlich wie beim Process-Mining insgesamt liegt der Schwerpunkt in der überwiegenden Zahl der kombinierten Methodenanwendungen wiederum nicht in der Produktion, sondern im Geschäftsprozessmanagement (Camargo et al. 2020). Ferner kommt in einer Reihe von Fällen als Simulationsmethode nicht die ereignisdiskrete Simulation, sondern System Dynamics zum Einsatz (vgl. Pourbafrani et al. 2020). Langer et al. (2021) beschreiben eine Kombination von Process-Mining und Simulation im Produktionsbereich. Der Schwerpunkt der Verknüpfung liegt dabei auf der Nutzung der aus dem Process-Mining gewonnenen Daten zur Parametrisierung eines Simulationsmodells. Insoweit gehen die im Folgenden beschriebenen Ansätze darüber hinaus, da

insbesondere auch die Ableitung von Strukturinformationen für den Aufbau von Simulationsmodellen durch Process-Mining unterstützt werden soll.

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten sind im Rahmen einer Forschungsk Kooperation der Universität Kassel, der BMW AG und der SimPlan AG Konzepte für die gemeinsame Nutzung von Process-Mining und ereignisdiskreter Simulation in Produktion und Logistik entstanden. Eine erste Diskussion dazu findet sich in Özkul et al. (2022). Bei der Erarbeitung dieser Konzepte hat die Anwendungsorientierung eine wichtige Rolle gespielt. Dabei sind zwei Konzepte entstanden, die im Folgenden beschrieben werden. Bei dem ersten beschriebenen Konzept steht eher die Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten von Process-Mining mit Hilfe von Simulation im Vordergrund (Abschnitt 2.1) und beim zweiten Konzept die Verbesserung und Vereinfachung der Simulation unter Nutzung von Process-Mining (Abschnitt 2.2).

2.1 Process-Mining für Prozessvarianten

Das im Folgenden beschriebene Konzept richtet sich in erster Linie an Anwender von Process-Mining. Die Idee ist, diese in die Lage zu versetzen, „Was-wäre-wenn“-Fragen zu untersuchen. Denn – wie einleitend beschrieben – erlaubt die Verwendung von Ereignisprotokollen, in denen ausschließlich Ist-Daten enthalten sind, zwar umfassende Analysen protokollierter zurückliegender Abläufe. Wie sich Veränderungen am Ist-Prozess auf Prozessabläufe und Ereignisse auswirken würden, lässt sich auf Basis von Vergangenheitsdaten nicht analysieren.

Das in Abbildung 1 schematisch dargestellte Konzept sieht vor, aus den vergangenheitsbezogenen Ereignisprotokollen mit Ist-Daten (in der Abbildung mit (1) gekennzeichnet) automatisch (relativ abstrakte) Simulationsmodelle zu erzeugen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel auf Basis des Simulationswerkzeugs Plant Simulation (4). Die Erzeugung der Simulationsmodelle erfolgt mithilfe von Diensten, wie sie von Process-Mining-Bibliotheken wie beispielsweise pm4py zur Verfügung gestellt werden (Berti et al. 2019).

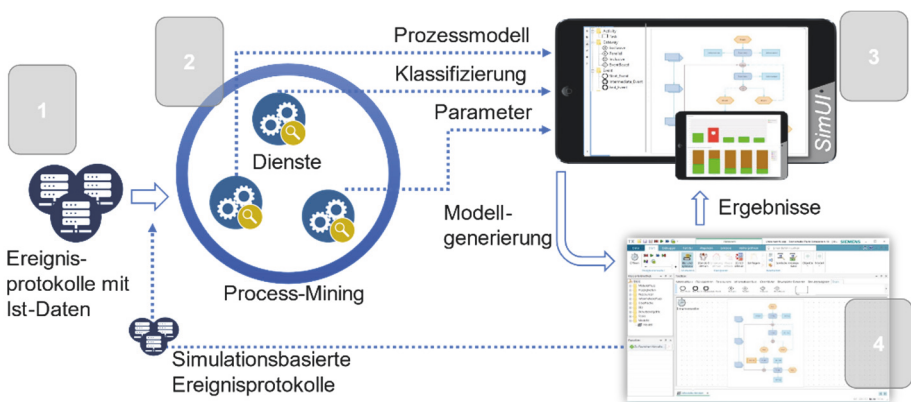


Abbildung 1: Schematische Darstellung des ersten Konzeptes zur Verknüpfung von Simulation und Process-Mining

Diese Dienste erlauben den Aufbau von Prozessgraphen aus den Ereignisprotokollen beispielsweise als DFGs, als BPMN-Modelle oder als Petri-Netze. Zudem stellen sie Funktionen zur Ermittlung von Parametern wie etwa der Dauer von Prozessen bereit und erlauben die Klassifizierung der Elemente der Prozessgraphen. Die Graphen und die ermittelten Daten können über eine geeignete Bedienoberfläche visualisiert werden (3), bevor sie an ein Simulationswerkzeug wie Plant Simulation weitergereicht werden. Die Simulation von DFGs, BPMN-Modellen und Petri-Netzen setzt im Grunde lediglich geeignete Objektbibliotheken im dazu eingesetzten ereignisdiskreten Simulationswerkzeug voraus (vgl. Rozinat et al. 2009). Die Bedienoberfläche dient im vorliegenden Konzept auch zur Visualisierung von Simulationsergebnissen wie etwa der Auslastung einzelner Knoten des simulierten Graphen oder der Durchlaufzeit von Entitäten durch den Graphen. Ein weiterer wesentlicher Zweck der Bedienoberfläche ist die Erstellung von Varianten des Ist-Prozesses, die dann wiederum an das Simulationswerkzeug weitergeleitet und simuliert werden können. Abbildung 2 zeigt im mittleren mit (a) gekennzeichneten Bereich einen Ausschnitt aus einem DFG, der auf Basis eines Ereignisprotokolls mit Ist-Daten erstellt worden ist. Im rechten Teil (b) ist zu erkennen, dass neben der aktuell dargestellten Variante „DFG_Ist“ bereits zwei weitere Varianten „DFG_Variante_1“ und „DFG_Variante_2“ zur Analyse alternativer Prozessabläufe angelegt worden sind. Mit den im linken Teil der Abbildung dargestellten Elementen (c) können strukturelle Änderungen am DFG interaktiv durchgeführt werden.

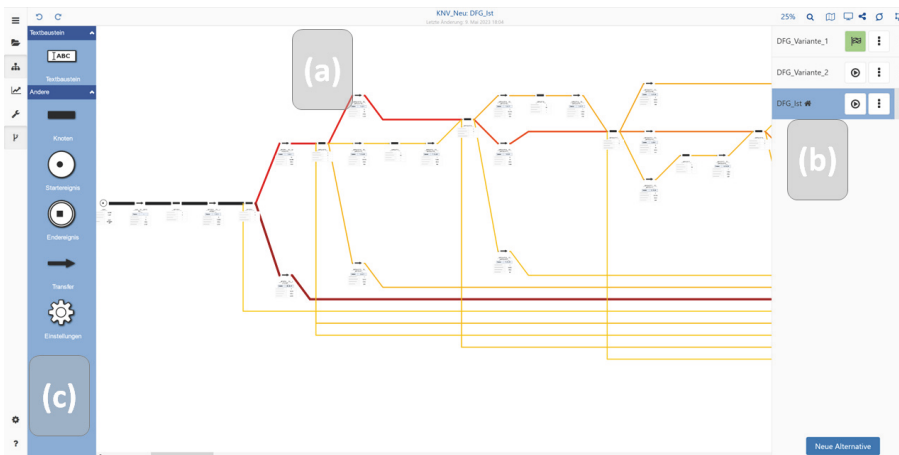


Abbildung 2: Bedienoberfläche mit simulativ vergleichbaren DFG-Prozessvarianten

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Varianten lassen sich dann zum einen in der Bedienoberfläche miteinander vergleichen. Zum anderen sind die Objekte zur Simulation von DFGs im Simulationswerkzeug so angelegt, dass bei jedem Simulationslauf Ereignisprotokolle erzeugt werden können. Die aus den verschiedenen Varianten erzeugten simulationsbasierten Ereignisprotokolle lassen sich dann mit Hilfe der Process-Mining-Dienste analysieren und einander gegenüberstellen. Damit schließt sich der in Abbildung 1 dargestellte Kreislauf und Process-Mining kann mithilfe der Simulation auch für alternative Prozessvarianten im Sinne einer Szenarienbeurteilung durchgeführt werden.

2.2 Überprüfung von detaillierten Simulationsmodellen

Im zweiten Konzept dient das Process-Mining der Validierung von vorhandenen Simulationsmodellen. Die Motivation ist, dass bei BMW wie in vielen anderen Unternehmen auch, zahlreiche Simulationsmodelle für unterschiedliche Teilbereiche der Produktion vorliegen. Im Fall eines Fahrzeugherstellers wie BMW können das z. B. Modelle für Karosseriebau, Lackiererei, Montage, Komponenten oder den Antriebsstrang sein. Die oft sehr detaillierten Simulationsmodelle entstehen während der Planung der jeweiligen Produktionsbereiche und werden anschließend über mehrere Jahre hinweg benutzt. Diese Nutzung erfolgt in vielen Fällen nicht kontinuierlich, sondern bedarfsweise jeweils dann, wenn Änderungen durch Stückzahlerhöhungen oder durch die Integration neuer Produktvarianten bevorstehen (Mayer und Spieckermann 2010). Dabei können zwischen zwei Verwendungen eines Modells mehrere Monate oder sogar Jahre liegen, in denen die Daten im Modell nicht regelmäßig oder überhaupt nicht aktualisiert werden. Vor einer neuen Verwendung ist es daher erforderlich, die Eingangsdaten einer Prüfung zu unterziehen. Nimmt diese Prüfung zu viel Zeit in Anspruch, steht das überprüfte Modell unter Umständen nicht rechtzeitig zur Unterstützung der Änderungsplanung zur Verfügung. Erfolgt die Prüfung nicht gründlich genug, kommt es möglicherweise zu fehlerhaften Simulationsergebnissen. Beide Fälle verringern die Akzeptanz des Simulationseinsatzes. Ein zügiger und zuverlässiger Abgleich des aktuellen Zustands des Produktionsbereichs mit dem vorliegenden Modell ist also unbedingt wünschenswert.

Die Idee des zweiten Konzeptes besteht nun genau darin, diesen Abgleich hinsichtlich der Datenaktualität zu vereinfachen, zu beschleunigen und gleichzeitig die Qualität des Abgleichs zu erhöhen. Dazu werden Ereignisprotokolle aus dem realen Produktionsbereich und Ereignisprotokolle aus dem detaillierten Simulationsmodell dieses Bereichs mit Hilfe von Process-Mining gegenübergestellt. Im Grunde stimmen die wesentlichen Komponenten mit dem in Abbildung 1 dargestellten ersten Konzept überein. Der wesentliche Unterschied ist, dass das Simulationsmodell nicht aus dem Ereignisprotokoll der Ist-Daten generiert wird, sondern unabhängig von Process-Mining-Diensten als detailliertes Planungssimulationsmodell vorliegt. Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Prozessgraphen ist, dass das Simulationsmodell die gleichen Bezeichnungen für Aktivitäten und Ressourcen wie die reale Anlage verwendet, oder eine entsprechende Zuordnung zwischen diesen Bezeichnungen vorgenommen wird. Über die Bedienoberfläche können die Strukturen und Daten der Prozessgraphen verglichen und erforderliche Änderungen am Simulationsmodell abgeleitet werden. Im Unterschied zum ersten Konzept werden allerdings keine Simulationsmodelle generiert. Vielmehr werden geänderte Eingangsdaten zur Konfiguration an das Simulationsmodell weitergegeben, um die Aktualität des Modells zu gewährleisten.

3 Überprüfung der Verknüpfung an Fallbeispielen

Im Rahmen des Forschungsprojektes liegen vier Fallbeispiele vor. Im ersten Schritt werden die Lösungskonzepte anhand von zwei Laborbeispielen getestet und demonstriert. Darauf aufbauend erfolgt eine Überprüfung anhand von zwei realen Anlagen. Auf die Erfahrungen mit den realen Anlagen wird im Folgenden näher eingegangen.

3.1 Fallbeispiel Kommissionieranlage

Bei der Kommissionieranlage handelt es sich um einen Teilbereich eines Distributionszentrums für Bücher. Abbildung 3 vermittelt einen groben Eindruck des betrachteten Systemausschnitts. Hierbei handelt es sich um eine Bahnhofskommissionierung (ten Hompel et al. 2019), bei der Kommissionierbehälter zu Kommissionierbahnhöfen fahren, von denen es 45 Stück gibt, die auf drei Kommissionierschleifen verteilt sind.

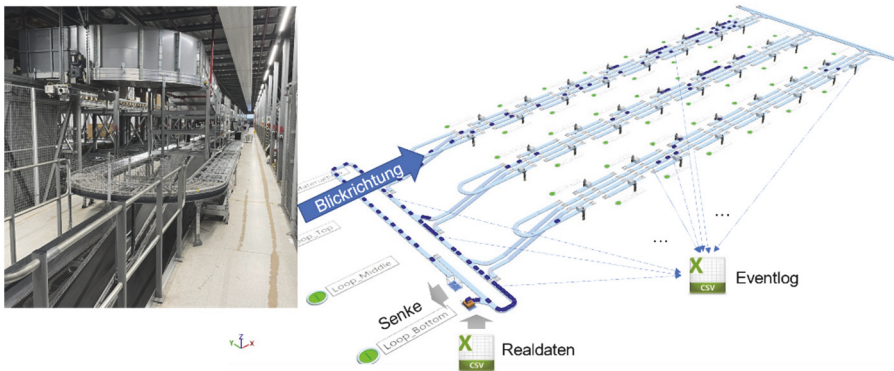


Abbildung 3: Foto und 3D-Layout des Kommissionierbereichs

Die Wahl dieses Beispiels ist dadurch begründet, dass von ca. 110 – über die Förder-technik verteilten – Meldepunkten Ist-Daten vorliegen, aus denen Ist-Ereignisprotokolle erstellt werden können. Abbildung 4 vermittelt anhand eines Ausschnitts aus einem Teilbereich einer Kommissionierschleife einen Eindruck von der Anordnung der Bahnhöfe und der Vielzahl der Meldepunkte (für Einfahrt, Bearbeitung und Ausfahrt an jedem Bahnhof). Das Meldepunktprotokoll einer typischen 8-Stunden-Schicht umfasst ca. 220.000 Einträge für ca. 3.500 Kommissionierbehälter.

Zunächst war geplant, an diesem Fallbeispiel das in Abschnitt 2.1 beschriebene Konzept zu testen. Hierzu sollten aus den Ist-Daten grobe, auf DFGs basierende Simulationsmodelle erzeugt und variiert werden. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass die Erzeugung von groben Simulationsmodellen, die die Abläufe in der realen Anlage hinreichend genau wiedergeben, selbst bei einer so detaillierten Meldepunktstruktur wie im vorliegenden Beispiel eine große Herausforderung ist. Das hängt mit der unter anderem in Özkul et al. (2022) diskutierten Diskrepanz zwischen der prozessbezogenen, auf Aktivitäten und Beziehungen zwischen diesen Aktivitäten beschränkten Betrachtungsweise im Process-Mining und dem auch im vorliegenden Beispiel am layoutorientierten strukturbezogenen Aufbau vieler Simulationsmodelle zusammen. Im konkreten Fall werden aus den Meldepunkten des Layouts die Knoten

des DFG. Das führt je nach Anordnung der Meldepunkte dazu, dass unterschiedliche Layoutvarianten auf die gleichen Teilstrukturen des Graphen abgebildet werden.

Abbildung 5 zeigt dafür ein Beispiel mit drei Meldepunkten. Die auf der linken Seite der Abbildung dargestellten drei Layoutvarianten führen alle zum gleichen Prozessgraphen. Die daraus resultierenden Abweichungen beim Pufferverhalten und bei Durchlaufzeiten führen dazu, dass es im Fall der Kommissionieranlage mit dem ersten Konzept bislang nicht gelungen ist, ein Ist-Ereignisprotokoll zu rekonstruieren.

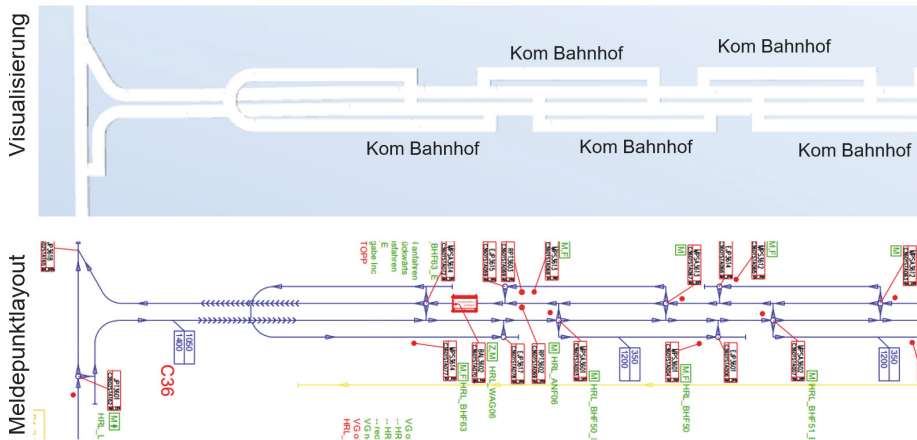


Abbildung 4: Fördertechnikvisualisierung (2D) und Meldepunktlayout (Ausschnitte)

Für die Rekonstruktion werden – dem in Abbildung 1 dargestellten Weg folgend – die Ist-Daten der Anlage eingelesen und anschließend mit Hilfe der Process-Mining-Dienste in ein DFG umgesetzt, aus dem dann ein Simulationsmodell generiert wird. Ein aus diesem Simulationsmodell erzeugtes Ereignisprotokoll unterscheidet sich allerdings deutlich vom ursprünglichen Ist-Ereignisprotokoll.

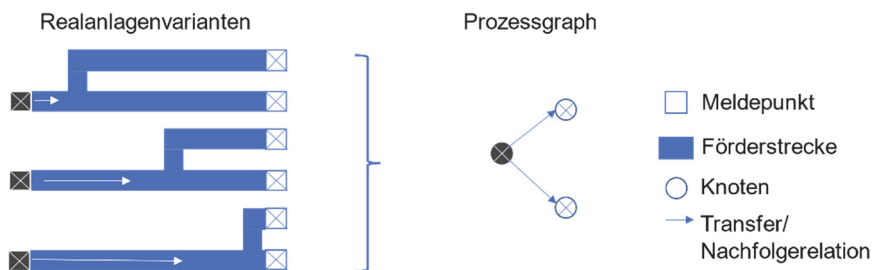


Abbildung 5: Meldepunktanordnungen und resultierender Prozessgraph

Die Verwendung zusätzlicher Eigenschaften in den Ereignisprotokollen oder darauf aufbauend die Ableitung zusätzlicher Informationen aus den Protokollen bieten perspektivisch die Möglichkeit, die Prozessgraphen und die daraus generierten Simulationsmodelle zu verfeinern. Ohne derartige Verfeinerungen führt der erste Ansatz für

Systeme mit der Komplexität der hier gezeigten Kommissionieranlage allerdings nicht zu den angestrebten Ergebnissen.

3.2 Fallbeispiel Hochvoltspeichermontage

Das zweite Fallbeispiel ist eine Hochvoltspeichermontage. Bei Hochvoltspeichern handelt es sich vereinfacht ausgedrückt um die „Batterien“ eines Elektrofahrzeugs. Der Speicher wird aus einer Reihe von einzelnen Batteriezellen zusammengesetzt, verkabelt und mit Steuerungselektronik versehen. Die Hochvoltspeicher durchlaufen im vorliegenden Beispiel ca. 80 Stationen. Abbildung 6 vermittelt einen groben Überblick über das Gesamtlayout und über die Komplexität der Startanlage.



Abbildung 6: Überblickslayout der Batteriezellenmontage mit Startanlage in 3D

Für dieses Montagesystem liegt zum einen ein vom Anlagenlieferanten erstelltes detailliertes Simulationsmodell aus der Planungsphase vor. Zum anderen werden für die mittlerweile im operativen Betrieb befindliche Anlage fortlaufend Statusmeldungen aus den 80 Stationen aufgezeichnet. Grundsätzlich sind damit die Voraussetzungen gegeben, an diesem Fallbeispiel das in Abschnitt 2.2 beschriebene zweite Konzept zur Verknüpfung von Process-Mining und Simulation zu testen. Der erste „naive“ Ansatz, die Anlagenstatusmeldungen in Ereignisprotokollen zu erfassen und hieraus DFGs zu generieren, führte allerdings zu Graphen, deren Knotenanzahl die Anzahl der Entscheidungspunkte und Stationen in der Anlage um ein Vielfaches überstieg. Eine Analyse hat gezeigt, dass pro Montagevorgang in einer Station teilweise eine ganze Abfolge von Meldungen erzeugt und protokolliert wird, sodass eine Reihe von Verdichtungen und Filterungen erforderlich ist. Umgekehrt hat sich gezeigt, dass die im Simulationsmodell für Meldepunkte verwendete Nomenklatur nur zum Teil mit den Be-

zeichnungen in der realen Montageanlage übereinstimmt, sodass vor allem Herausforderungen im Zusammenhang mit der Schaffung einer hinreichenden Datenqualität für die industrielle Anwendung erkennbar sind. Obwohl die Vergleiche zwischen aufbereitetem Ereignisprotokoll mit Ist-Daten und Ereignisprotokollen aus dem Planungssimulationsmodell noch nicht abgeschlossen sind, zeichnet sich bereits ab, dass eine Reihe von Anpassungen am Simulationsmodell erforderlich werden, damit die simulierten Abläufe dem realisierten Anlagenstand entsprechen.

4 Fazit und Ausblick

Mit der sehr guten Datengrundlage aus Fallbeispielen aus Produktion und Logistik wird erkennbar, dass der mit den beschriebenen Forschungsarbeiten zur Verknüpfung von Process-Mining und Simulation verbundene Weg zur Schaffung von Synergien aus der Interaktion der beiden Methoden weiter ist, als zu Beginn der gemeinsamen Arbeiten erwartet. Eine Herausforderung liegt in Abweichungen, die sich aus der layoutorientierten Strukturbezogenheit der betrachteten realen Systeme einerseits und der prozessbezogenen Betrachtungsweise des Process-Mining andererseits ergeben. Zu weiteren Herausforderungen können die Verdichtung der Vielzahl protokollierter Meldungen auf materialflussrelevante Ereignisse sowie generell die hohe Anzahl an Aktivitäten in Ereignisprotokollen werden. Potenziale zur Verbesserung des Zusammenspiels zwischen Process-Mining und Simulation liegen in der Nutzung ergänzender Informationen beim Aufbau der Graphen (Göttlich et al. 2020) oder in der Ergänzung des Process-Mining um Ansätze aus dem Decision-Mining (vgl. de Leoni und van der Aalst 2013).

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „SimProve – Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining zur effizienteren Analyse und Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen“, das durch Mittel des Landes Hessen im Rahmen des Distr@l-Programms gefördert und von September 2021 bis September 2023 unter Konsortialführerschaft der SimPlan AG durchgeführt wird.

Literatur

- Agrawal, R.; Gunopulos, D.; Leymann, F.: Mining process models from workflow logs. In: Schek, H.-J.; Alonso, G.; Saltor, F.; Ramos, I. (Hrsg.): *Advances in Database Technology - EDBT'98*. Berlin, Heidelberg: Springer 1998, S. 467-483.
- Berti, A.; van Zelst, S.J.; van der Aalst, W.M.P.: *Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science*. In: Burattin, A.; Polyvyanyy, A.; van Zelst, S.: *Proceedings of the ICPM Demo Track 2019 co-located with 1st International Conference on Process Mining, Aachen (Deutschland), 24.-26. Juni 2019*, S. 13-16.
- Camargo, M.; Dumas, M.; González-Rojas, O.: Automated discovery of business process simulation models from event logs. *Decision Support Systems* 134 (2020), S. 1-13.

- de Leoni, M.; van der Aalst, W.M.P.: Data-aware Process Mining: Discovering Decisions in Processes Using Alignments. In: Shin, D. (Hrsg.): Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, Coimbra (Portugal), 18.-22. März 2013, S. 1454-1461.
- Garcia, C.d.; Meinheim, A.; Faria Junior, E.R.; Dallagassa, M.R.; Sato, D.M.; Carvalho, D.R.; Santos, E.A.; Scalabrin, E.E.: Process mining techniques and applications – A systematic mapping study. *Expert Systems with Applications* 133 (2019), S. 260-295.
- Gartner Research: Forecast Analysis: Process Mining, Worldwide, 2021.
- Göttlich, S.; Spieckermann, S.; Stauber, S.; Storck, A.: Data-driven graph drawing techniques with applications for conveyor systems. *Journal of Mathematics in Industry*, 10 (2020) 1, S. 1-23.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer Vieweg 2017.
- Knoll, D.; Waldmann, J.; Reinhart, G.: Developing an internal logistics ontology for process mining. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 427–432.
- Langer, A.; Ortmeier, C.; Martin N.L.; Abraham, T.; Herrmann, C.: Combining Process Mining And Simulation. In Production Planning. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021), Vancouver (Kanada), 25.-28. Mai 2021, S. 264-273.
- Lechner, P.: BMW: Process Mining @ Production. In: Reinkemeyer, L. (Hrsg.): Process Mining in Action. Cham: Springer, 2020, S. 65-73.
- Mayer, G.; Mieschner, M.: Industrie 4.0 – Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017, Kassel (Deutschland), 20.-22. September 2017, S. 1-8.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2013, Paderborn (Deutschland), 9.-11. Oktober 2013, S. 11-19.
- Mayer, G.; Spieckermann, S.: Life-cycle of simulation models: requirements and case studies in the automotive industry. *Journal of Simulation* 4 (2010), S. 255–259.
- Özkul, F.; Sutherland, R.; Wenzel, S.; Jessen, U.; Spieckermann, S.: Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining in Produktion und Logistik. In: Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): ASIM SST 2022 Proceedings, Wien (Österreich), 25.-27. Juli 2022, S. 39-48.
- Pourbafrani, M.; van der Aalst, W.M.P.: Hybrid Business Process Simulation: Updating Detailed Process Simulation Models Using High-Level Simulations. In: Guizzardi, R.; Ralyté, J.; Franch, X. (Hrsg.): Research Challenges in Information Science, Barcelona (Spanien), 17.-20. Mai 2022, S. 177-194.
- Pourbafrani, M.; van Zelst, S.J.; van der Aalst, W.M.P.: Supporting Automatic System Dynamics Model Generation for Simulation in the Context of Process Mining. In: Abramowicz, W.; Klein, G. (Hrsg.): Business Information Systems, Colorado Springs (USA), 8.-10. Juni 2020, S. 249-263.
- Rozinat, A.; Mans, R.S.; Song, M.; van der Aalst, W.M.P.: Discovering simulation models. *Information Systems* 34 (2009) 3, S. 305-327.
- Spieckermann, S.; Griffel, N.; Hoffmann, H.: Neues Simulationsmodell bildet Materialfluss im Rohbau eines Automobilherstellers ab. *Logistik im Unternehmen* 11 (1997) 10, S. 80-83.

- ten Hompel, M.; Sadowsky, V.; Mühlenbrock, S.: Kommissioniersysteme. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik, Berlin: Springer 2019, S. 113-152.
- van der Aalst, W.M.P.: Process mining and simulation: a match made in heaven! In: Padilla, J.J.; Lynch, C.J. (Hrsg.): Summer Computer Simulation Conference (SummerSim 2018), Bordeaux (Frankreich), 9.-12. Juli 2018, S. 1-12.
- van der Aalst, W.M.P.: Process Mining: A 360 Degree Overview. In: van der Aalst, W.M.P.; Carmona, J. (Hrsg.): Process mining handbook. Cham: Springer 2022, S. 3-34.
- van der Aalst, W.M.P.; Weijters, A.: Process mining: a research agenda. Computers in Industry 53 (2004) 3, S. 231-244.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Maschinelles Lernen von Maschinenfolgen für den simulationsbasierten Test von Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung

Machine Learning of Machine Sequences for the Simulation-Based Test of Methods for Production Planning and Control

Marvin Matthes, Oliver Guhr, Torsten Munkelt, Martin Krockert
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden (Germany),
{Marvin.Matthes, Oliver.Guhr, Torsten.Munkelt, Martin.Krockert}@htw-dresden.de
Sven Völker, Technische Hochschule Ulm,
Ulm (Germany), Sven.Voelker@thu.de

Abstract: Evaluating production planning and control (PPC) methods by means of simulation requires test data. Models of machine sequences of real productions can be created using machine learning. The paper describes how transformers and Bayesian networks are learned from real-life data of a manufacturing company. Both model types are well known for learning sequences with multiple conditional dependencies. These models are used to generate machine sequences which should be similar to the original machine sequences in terms of their statistical properties. From the generated machine sequences, work plans and production orders can be derived and used to test PPC methods by means of stochastic discrete-event simulation.

1 Einleitung

Viele Verfahren zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sind Heuristiken. Ihre Effektivität und Effizienz können in der Regel nicht analytisch, sondern nur empirisch ermittelt werden, wozu gemeinhin stochastische ereignisdiskrete Simulation genutzt wird. Um Aussagen über die Eignung von PPS-Verfahren zu treffen, die sich nicht nur auf eine spezielle Produktion beziehen, sondern eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen, werden Testdaten benötigt, die Produktionen mit unterschiedlichen Eigenschaften realitätsnah abbilden. Testdaten aus öffentlich zugänglichen Problembibliotheken (Taillard 1993) mangelt es meist an Realitätsnähe. Derartige Daten in realen Produktionssystemen zu erheben, ist aus praktischen Gründen (Aufwand, Zugänglichkeit, Vertraulichkeit) schwierig oder unmöglich. Eine Alternative besteht darin, Testdaten zu generieren. Dieser Ansatz wurde bereits in der Vergangenheit verfolgt (Fernandes et al. 2020, Adolph et al. 2015). Ein wesentlicher

Bestandteil von PPS-Testdaten sind Maschinenfolgen, welche Arbeitsplänen und Produktionsaufträgen zugrunde liegen. In Döring et al. (1999) und Völker et al. (2001) sind Maschinenfolgen aufgrund plausibler Annahmen generiert worden. Die Analyse realer Produktionsdaten zeigt aber, dass diese Annahmen nicht immer zutreffen. Krockert et al. (2021) sind deshalb dazu übergegangen, Maschinenfolgen realer Produktionen zu analysieren und aufgrund der Analyseergebnisse Maschinenfolgen zu synthetisieren. Eine besondere Herausforderung liegt dabei in der Synthese wiederkehrender Muster aufeinanderfolgender Maschinen, sogenannter Submaschinenfolgen.

2 Maschinenübergangsmatrizen zur Generierung von Maschinenfolgen

Maschinenübergangsmatrizen bzw. -graphen sind Standardmodelle zur abstrakten Beschreibung von Maschinenfolgen (Schuh 2012). Sie werden im vorliegenden Beitrag als Referenz zum Einsatz von Bayes'schen Netzen und Transformern genutzt. Eine Maschinenübergangsmatrix ist eine quadratische Matrix, deren Elemente π_{ij} die Wahrscheinlichkeit des Übergangs von Maschine i auf Maschine j angeben. Sie können als Maschinenübergangsgraphen visualisiert werden. Beispielhaft stellt Abbildung 1 eine Maschinenübergangsmatrix in Form eines zweidimensionalen Säulendiagrammes und einen Maschinenübergangsgraphen dar. Eine bedeutende Limitation dieser Modellform besteht darin, dass wiederkehrende Submaschinenfolgen nicht adäquat abgebildet werden, weil die Wahrscheinlichkeit für den Übergang von Maschine i auf Maschine j lediglich von Maschine i abhängt. Daher bleiben potenzielle Muster in den vorausgehenden und nachfolgenden Maschinenfolgen unberücksichtigt.

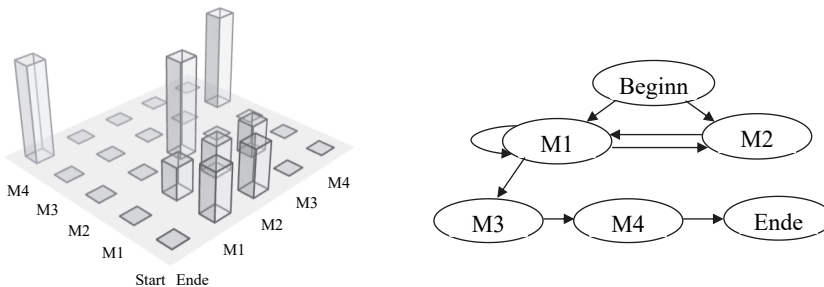


Abbildung 1: Beispiel für eine Maschinenübergangsmatrix und einen Maschinenübergangsgraphen

3 Kennzahlen zur statistischen Beschreibung von Maschinenfolgen

Die statistischen und strukturellen Eigenschaften von Maschinenfolgen können durch Kennzahlen beschrieben werden. Diese Kennzahlen können sowohl aus den Maschinenfolgen der Realdaten als auch aus den mittels maschineller Lernverfahren generierten Maschinenfolgen gewonnen werden. Aus dem Vergleich der Kennzahlen lassen sich quantitative Aussagen über die Güte der Verfahren ableiten.

Der von Döring et al. (1999) vorgeschlagene *Organisationsgrad (OG)* (siehe Formel 1) ist ein Maß für den Organisationstyp einer Produktion. Der OG erlaubt, stufenlos zwischen Organisationstypen einer Produktion unterscheiden, von der Werkstatt- bis zur Fließfertigung. Er wird gemäß folgender Formel berechnet, wobei M die Menge der Maschinen repräsentiert und π_{ij} die Wahrscheinlichkeit des Übergangs von Maschine i auf Maschine j .

$$OG = \frac{1}{|M| - 1} \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|M|} \left(\pi_{ij} - \frac{1}{|M|} \right)^2 \quad (1)$$

Abbildung 2 veranschaulicht den OG anhand dreier Maschinenübergangsmatrizen mit ihren OGen und Organisationstypen.

	M1	M2	M3	Senke
Quelle	1,0	0	0	0
M1	0	1,0	0	0
M2	0	0	1,0	0
M3	0	0	0	1,0

Fließfertigung (OG = 1)

	M1	M2	M3	Senke
Quelle	0,76	0,18	0,05	0,01
M1	0,08	0,70	0,17	0,04
M2	0,01	0,09	0,73	0,17
M3	0,00	0,01	0,11	0,88

Gemischte Fertigung (OG = 0,5)

	M1	M2	M3	Senke
Quelle	0,25	0,25	0,25	0,25
M1	0,25	0,25	0,25	0,25
M2	0,25	0,25	0,25	0,25
M3	0,25	0,25	0,25	0,25

Werkstattfertigung (OG = 0)

Abbildung 2: Maschinenübergangsmatrizen und Organisationsgrade für unterschiedliche Organisationstypen

Die *Anzahl unterschiedlicher Maschinen (Maschinenordnung MO)* (siehe Formel 2) in einer Maschinenfolge weist auf verschiedene Maschinen und eine komplexere Produktion und komplexere Materialien hin.

$$MO = |M| \quad (2)$$

M ... Menge unterschiedlicher Maschinen in allen Maschinenfolgen

Mit der *mittleren Länge der Maschinenfolge (Mittlere Länge ML)* (siehe Formel 3) wird die durchschnittliche Anzahl von Maschinen in einer Maschinenfolge definiert. Sie kann als Indikator für die Komplexität und den Umfang der betrachteten Maschinenfolgen verwendet werden.

$$ML = \frac{\sum_{i=1}^{|S|} l_{s_i}}{|S|} \quad (3)$$

S ... Menge aller Maschinenfolgen

s_i ... spezifische Maschinenfolgen, wobei $1 \leq i \leq |S|$

l ... Länge einer Maschinenfolge

Die *relative Häufigkeit des Vorkommens von Maschinen in Maschinenfolgen (Maschinenvorkommen RMV_j)* (siehe Formel 4) gibt an, wie oft eine bestimmte Maschine in allen Maschinenfolgen vorkommt.

$$RMV_j = \frac{V_j}{\sum_{i=1}^{MO} V_i} \quad (4)$$

V_m ... Gesamtzahl der Vorkommen einer Maschine m in alle Maschinenfolgen

Die *relative Häufigkeit des Vorkommens von Submaschinenfolgen* (Subfolgen-vorkommen RSV_j) (siehe Formel 5) beschreibt, wie oft bestimmte Submaschinenfolgen in den untersuchten Maschinenfolgen vorkommen. In diesem Beitrag werden Submaschinenfolgen mit einer Länge zwischen drei und sechs Maschinen ermittelt. Die Identifikation häufiger Submaschinenfolgen kann dabei helfen, Muster und in Maschinenfolgen aufzudecken. Die Häufigkeiten von Subfolgen lassen sich zudem als Histogramme darstellen und vergleichen.

$$RSV_j = \frac{\sum_{i=1}^{|S|} v_{ij}}{\sum_{i=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|T|} v_{ij}} \quad (5)$$

T ... Menge aller möglichen Submaschinenfolgen mit einer Länge l , wobei $3 \leq l \leq 6$

t_j ... spezifische Submaschinenfolgen, wobei $1 \leq j \leq |T|$

v_{ij} ... Anzahl der Vorkommen der Submaschinenfolgen t_j in der Maschinenfolgen s_i

4 Maschinelles Lernen von Modellen für Maschinenfolgen aus Produktionsdaten

Zunächst werden Ansätze vorgestellt, um aus vorliegenden Maschinenfolgen realer Produktionen Modelle für Maschinenfolgen maschinell zu erlernen und die Modelle anschließend zum Generieren neuer Maschinenfolgen zu verwenden. Bei den Modelltypen handelt es sich um Transformer (Vaswani et al. 2017) und Bayes'sche Netze (Neapolitan 2007, Neuberg 2003).

4.1 Transformer

Das erste für die Generierung von Maschinenfolgen eingesetzte Modell ist ein Transformer, der auf einer autoregressiven Architektur basiert. Die Transformer-Architektur wurde von Vaswani et al. (2017) vorgeschlagen, und sie hat sich für eine Vielzahl von Anwendungen in der Verarbeitung natürlicher Sprache und darüber hinaus etabliert. Der autoregressive Ansatz wurde durch die Arbeiten von Radford et al. (2018), Radford et al. (2019) und Brown et al. (2020) eingeführt und weiterentwickelt. Dieser Abschnitt beschreibt, wie der Transformer für das spezifische Problem adaptiert worden ist und welche Verbesserungen vorgenommen worden sind.

Ein autoregressiver Transformer ist ein neuronales Netz, das sequenzielle Daten verarbeitet, indem es eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über mögliche nächste Elemente in der Sequenz erlernt, wobei die vorherigen Elemente als Kontext verwendet werden (Abbildung 3). Transformer nutzen die Self-Attention, um Beziehungen zwischen verschiedenen Positionen innerhalb der Eingabesequenz zu erfassen und zu gewichten. So können sie das nächste Element in der Sequenz auf Basis der vorhergegangenen Elemente vorhersagen, siehe Formel (6).

$$P(x_t | x_1, x_2, \dots, x_{t-1}) = \text{Transformer}(x_1, x_2, \dots, x_{t-1}; \theta) \quad (6)$$

Dabei gibt x_t das t -te Element der Sequenz an, und $[x_1, x_2, \dots, x_{t-1}]$ sind die vorangegangenen Elemente in der Sequenz. Der autoregressive Transformer

verwendet die vorangegangenen Elemente als Kontext für die Prognose. Um die Wahrscheinlichkeitsverteilung für das nächste Element x_t zu erzeugen, wird der Ausgabevektor des Transformers von einem Multilayer Perceptron (MLP) klassifiziert. Mit θ wird die Menge der Gewichte des Transformers bezeichnet. Während des Trainingsprozesses werden die Gewichte angepasst, um die Leistung des Transformers bei der Vorhersage von den Daten zu optimieren. Die angepassten Gewichte ermöglichen es dem Transformer, Muster und Zusammenhänge in den Eingabesequenzen zu erkennen und entsprechende Vorhersagen für nächste Elemente der Sequenz zu treffen.

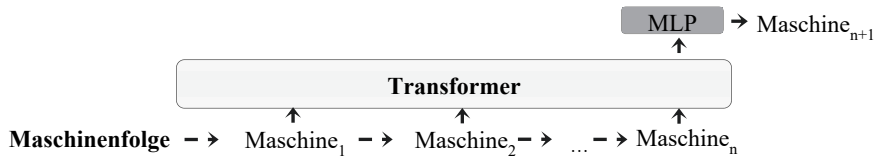


Abbildung 3: Aufbau des Transformers für die Maschinenfolge

Damit die Daten in der Sequenz $[x_1, \dots, x_t]$ vom Transformer verarbeitet werden können, müssen sie in ein geeignetes Format umgewandelt werden. Diese sogenannte Tokenisierung zerlegt die Eingabedaten in kleinere Einheiten, sogenannte Token. Im Kontext von Sprachmodellen bezieht sich die Tokenisierung auf die Zerlegung von Texten in diskrete Elemente wie Wörter, Wortgruppen oder Zeichen, abhängig von der gewählten Granularität. Die Token dienen dem Transformer als Eingabe, wodurch er in der Lage ist, die Struktur und Zusammenhänge innerhalb der Eingabesequenzen zu lernen.

Da sich die Struktur natürlicher Sprache von der von Maschinenfolgen unterscheidet, wird ein Tokenizer mit den gegebenen Produktionsdaten trainiert. Dabei kommt die „Byte-Pair Encoding (BPE)“-Tokenisierung nach Sennrich et al. (2016) zum Einsatz. Die BPE-Tokenisierung ist ein datengetriebener Ansatz, bei dem häufig vorkommende Zeichen- oder Byte-Paare in einer Eingabesequenz zu einem Token verschmolzen werden. Das Ergebnis ist ein Vokabular, das sowohl häufige als auch seltene Muster in den Daten effizient abbildet, wodurch eine flexible und anpassungsfähige Tokenisierung ermöglicht wird, die sich gut für die Abbildung von Maschinenfolgen eignet.

Die Struktur des Modells umfasst eine Token-Vektorlänge von 384, eine maximale Sequenzlänge von 150 Token, 8 Layer und 8 Attention-Heads. Um die Leistung des Modells weiter zu verbessern und es auf spezielle Anforderungen abzustimmen, sind Verbesserungen im Vergleich zum Standardmodell der Transformer-Architektur erfolgt: Erstens wird die "Swish"-Aktivierungsfunktion von Ramachandran et al. (2017) genutzt. Zweitens wird die "rotary positional embeddings" nach Sun et al. (2022) integriert, um die Skalierbarkeit und Robustheit des Modells bei der Verarbeitung langer Sequenzen zu verbessern. Drittens wird die "One Write-Head Attention"-Technik von Shazeer (2019) eingeführt, um den Berechnungsaufwand der Multi-Head Attention zu reduzieren und die Effizienz des Modells zu steigern. Schließlich wird das "Attention Head Scaling" nach Shleifer et al. (2021) angewandt, um die Leistungsfähigkeit des Modells weiter zu verbessern.

4.2 Bayes'sche Netze

Ein Bayes'sches Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph, dessen Knoten Zufallsvariablen und dessen Kanten direkte (kausale) Abhängigkeiten zwischen den Zufallsvariablen repräsentieren. Jedem Knoten bzw. jeder Zufallsvariable sind für jede Kombination von Zuständen der Elternknoten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet, die aussagen, wie wahrscheinlich die Zustände der Zufallsvariablen sind, bedingt durch die Zustände der Elternknoten. Bayes'sche Netze können aus Daten gelernt und u. a. zur Prognose, Diagnose und Sensitivitätsanalyse unter Unsicherheit verwendet werden. Zudem ist es möglich, aus Bayes'schen Netzen eine Stichprobe zu ziehen, welche den Daten statistisch entspricht, aus denen die Bayes'schen Netze erstellt worden sind.

In diesem Beitrag werden Bayes'sche Netze aus realen Maschinenfolgen einer Produktion gelernt, und im Anschluss werden Stichproben neuer Maschinenfolgen aus den Bayes'schen Netzen gezogen und anhand der in Abschnitt 3 vorgestellten Kennzahlen mit den originalen Maschinenfolgen verglichen. Da Bayes'sche Netze mehrfach bedingte Wahrscheinlichkeiten kodieren können, ist zu erwarten, dass sie häufig vorkommende Submaschinenfolgen besser erzeugen als Maschinenübergangsmatrizen.

Für die Modellierung eines Bayes'schen Netzes für Maschinenfolgen bieten sich drei Ansätze an:

- *Maschinen als Knoten mit binären Zuständen*: Die Knoten des Netzes repräsentieren Maschinen, die entweder in der Maschinenfolge vorkommen (Zustand 1) oder nicht (Zustand 0). Wenn eine Stichprobe aus einem solchen Netz gezogen wird, sagt sie allerdings nur aus, dass bestimmte Maschinen vorkommen, aber nicht, wie oft und in welcher Reihenfolge.
- *Maschinen als Knoten mit Zuständen zur Anzahl des Auftretens*: Die Knoten des Netzes repräsentieren wiederum Maschinen, aber die Zustände der Knoten sagen aus, wie oft die Maschine in der Maschinenfolge vorkommt. Wenn eine Stichprobe aus einem solchen Netz gezogen wird, sagt sie nun zwar auch aus, wie oft bestimmte Maschinen in der Maschinenfolge vorkommen, aber immer noch nicht in welcher Reihenfolge.
- *Positionen der Arbeitsgänge als Knoten*: Die Knoten des Netzes repräsentieren Positionen der Arbeitsgänge, und jede Arbeitsgangposition kann als Zustände der Maschinen annehmen, die an ihr vorkommen. Mit diesem Ansatz kann zusätzlich eine Reihenfolge der Maschinen abgebildet werden.

Offenkundig ist der dritte Modellierungsansatz „Positionen der Arbeitsgänge als Knoten“ am besten geeignet. Das Lernen erfolgt mit dem Score-basierten Hill-Climbing-Ansatz (Tyugu 2008) und dem BIC-Score als Gütemaß (Koller 2009). Für die anschließende Generierung der Maschinenfolgen aus dem Bayes'schen Netz wird das Forward-Sampling verwendet (Koller 2009). Abbildung 4 zeigt einen Auszug des für die Generierung von Maschinenfolgen gelernten Bayes'schen Netzes. Der dargestellte Ausschnitt repräsentiert die bedingte Abhängigkeit der Position 6 von der Position 5 der Maschinenfolge, wobei die zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Knoten der Position 6 dargestellt ist. Die erste Zeile der Wahrscheinlichkeitsverteilung besagt, dass, falls an Position 5 der Maschinenfolge die Maschine 10000 steht, mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 6,04% die Maschine 20000 auf Position 6 folgt.

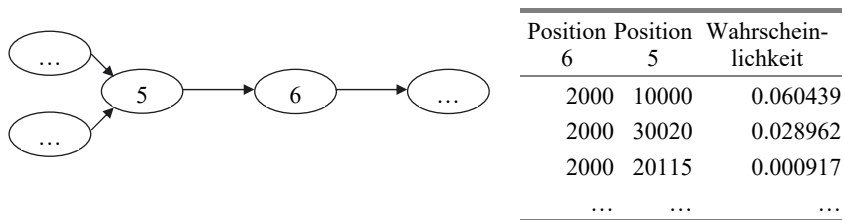


Abbildung 4: Auszug aus dem Bayes'schen Netze für Maschinenfolgen über die Positionen der Arbeitsgänge

5 Bewertung der Modelle zur Generierung von Maschinenfolgen

Das Ziel besteht darin, dass die erlernten Modelle die realen Maschinenfolgen möglichst gut abbilden. Um die Modelle zu bewerten, werden neue Maschinenfolgen generiert und mit den Realdaten anhand statistischer Kennzahlen (siehe Abschnitt 3) verglichen.

Abbildung 5 stellt den Prozess des maschinellen Lernens und den Vergleich der Modelle auf Basis der generierten Maschinenfolgen dar.

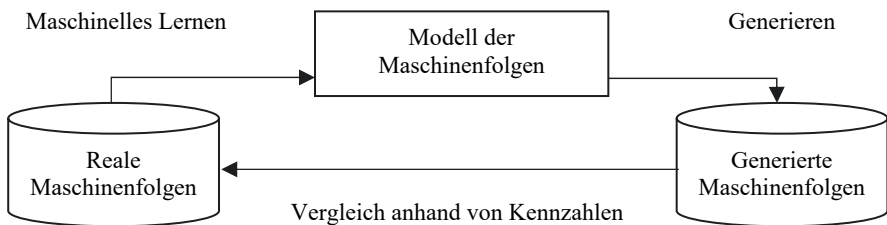


Abbildung 5: Vorgehen zum Generieren und Evaluieren von Maschinenfolgen

Eingabe für das maschinelle Lernen sind zirka 170.000 reale Maschinenfolgen aus Produktionsaufträgen eines metallverarbeitenden Betriebes mit 73 verschiedenen Maschinen. In einer Maschinenfolge können Maschinen mehrfach vorkommen, so dass Zyklen entstehen. Die relative Häufigkeit des Vorkommens einzelner Maschinen in den Maschinenfolgen unterscheidet sich stark: 15 der 73 Maschinen repräsentieren bereits 90 % der Maschinen in den Maschinenfolgen.

Das Ziel maschinellen Lernens besteht darin, die Verteilungen in den realen Maschinenfolgen möglichst gut im Modell abzubilden, d. h., generierte Maschinenfolgen und Realdaten sollten sich hinsichtlich der Kennzahlenausprägungen möglichst wenig unterscheiden. Die beiden Histogrammbasierten Kennzahlen zur relativen Häufigkeit des Vorkommens der Maschinen und der Submaschinenfolgen sind die euklidischen Distanzen zu den Realdaten. Tabelle 1 zeigt die Resultate des Vergleichs

Tabelle 1: Realitätsnähe der generierten Maschinenfolgen mit Hervorhebung der besten Werte je Kennzahl

Kennzahl	Realdaten (Zielwerte)	Trans- former	Bayes'sches Netz	Maschinen- übergangsmatrix
Organisationsgrad (<i>OG</i>)	0,51	0,54	0,28	0,43
Maschinenordnung (<i>MO</i>)	73,00	67,00	73,00	65,00
Mittlere Länge (<i>ML</i>)	5,22	5,29	5,15	7,40
Maschinenvorkommen (<i>RMV</i>)	0,00	3,64	0,65	48,78
Subfolgenvorkommen (<i>RSV</i>)	0,00	0,59	1,97	8,05

Die Auswertung verdeutlicht, dass sich *Bayes'sche Netze* sehr gut zur Abbildung der relativen Häufigkeit des Vorkommens der Maschinen und der Vollständigkeit der Maschinenordnung eignen. Allerdings zeigen sie Schwächen bei der Erkennung und Abbildung von Submaschinenfolgen. Im Gegensatz dazu erkennen *Transformer* Submaschinenfolgen sehr gut. Abbildung 6 zeigt die relativen Häufigkeiten von Submaschinenfolgen in den Realdaten sowie in den mittels der verschiedenen Modelle generierten Daten.

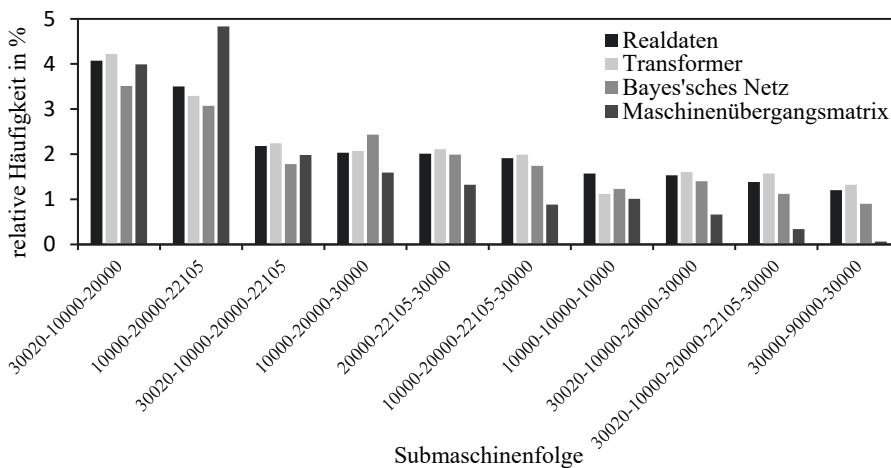


Abbildung 6: Vergleich der Modelle anhand der Histogramme der generierten Submaschinenfolgen

Transformer und Bayes'sche Netze weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Während der Transformer in der Lage ist, Submaschinenfolgen präzise zu erkennen, kann das Bayes'sche Netz zwar Gruppen von Maschinen identifizieren, die gemeinsam auftreten, hat allerdings Schwierigkeiten, die korrekte Reihenfolge der Maschinen zu bestimmen. Die Interpretation der erstellten Modelle ist schwierig. Bei den Transformern ist die Interpretation aufgrund ihrer Komplexität anspruchsvoll, jedoch ermöglicht die Visualisierung von Attention-Mechanismen eine gewisse Einsicht in die Modellentscheidungen. Bayes'sche Netze sind Graphenmodelle und deshalb tendenziell einfacher interpretierbar. Bei der gewählten Modellierungsart „Positionen der Arbeitsgänge als Knoten“ sind die direkten Abhängigkeiten allerdings

nur schwer und die zugrundeliegenden bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufgrund ihrer schieren Größe kaum noch zu interpretieren. Die Laufzeiten und der Speicherbedarf des maschinellen Lernens und Anwendens der Modelle variieren stark. Das Training eines Transformer-Modells über 15 Epochen benötigt beispielsweise 1:24 Minuten. Es ist dabei zu beachten, dass das resultierende Modell rund 13 Millionen Parameter aufweist und eine Größe von 52 MB hat. Der Prozess des Samplings zur Erstellung von 100.000 Maschinenfolgen nimmt auf einer GPU (Nvidia 4090) etwa 36 Minuten in Anspruch. Das Erlernen eines Bayes'sche Netzwerks dauert hingegen lediglich 5 Sekunden. Das Forward-Sampling von 100.000 Maschinenfolgen mit dem Bayes'schen Netz bedarf sogar nur einer Sekunde.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die Erstellung von Modellen für die Generierung von Maschinenfolgen mittels maschinellen Lernens auf der Basis von Realdaten. Die generierten Maschinenfolgen können in einem nachgelagerten Schritt für die Validierung von Algorithmen zur Produktionsplanung- und -steuerung z. B. mittels stochastischer ereignisdiskreter Simulation genutzt werden. Es wurden Transformer trainiert und Bayes'sche Netze gelernt, um neue Maschinenfolgen zu generieren. Die Analyse der generierten Maschinenfolgen ergibt, dass Bayes'sche Netzwerke die relative Häufigkeit des Vorkommens von Maschinen in Maschinenfolgen sowie die Maschinenordnung gut abbilden, jedoch Schwierigkeiten bei der Erkennung und Darstellung von Submaschinenfolgen haben. Im Gegensatz dazu sind Transformer effektiv bei der Erkennung von Submaschinenfolgen. Allerdings sind Transformer und – in diesem Fall auch – Bayes'sche Netze schwer zu interpretieren. Zudem verursachen Transformer in Größenordnungen mehr Rechenaufwand als Bayes'sche Netze.

Um die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren, könnten zukünftige Arbeiten das sukzessive Anwenden von Bayes'schen Netzen und von Transformern untersuchen: Die Netze bestimmen die Maschinen, die in einer generierten Maschinenfolge enthalten sein sollen, und die Transformer bringen diese Maschinen in eine Reihenfolge. Zudem wäre eine weitere Anwendung der durch maschinelles Lernen erstellten Modelle zu Generierung von Maschinenfolgen denkbar: Sie könnten z. B. die Erstellung von Arbeitsplänen unterstützen. Es ist auch denkbar, Modelle für günstige Abarbeitungsreihenfolgen von Arbeitsgängen auf Maschinen zu lernen, günstige Abarbeitungsfolgen zu generieren und somit einen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Produktion leisten.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Finanziert von der europäischen Union.

Literatur

Adolphy, S.; Grosser, H.; Kirsch, L.; Stark, R.: Method for Automated Structuring of Product Data and its Applications. In: Procedia CIRP 38 2015, S. 153–158.

- Brown, T. B.; Mann, B.; Ryder, N.; Subbiah, M.; Kaplan, J.; Dhariwal, P. et al.: Language Models are Few-Shot Learners 2020.
- Döring, T. Völker, S.; Munkelt, T.: Generierung komplexer Testdaten zur statistischen Analyse von Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung. In: Bösel, M. (Hrsg.): Amtliche und Nichtamtliche Statistiken - 12. Ilmenauer Wirtschaftsforum, Tagungsband: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Fachgebiet Wirtschaftsstatistik und Operations Research 1999, S. 34–46.
- Fernandes, E. C.; Santos, L. I. dos; Camatti, J. A.; Brown, L.; Borsato, M.: Flexible Production Data Generator for Manufacturing Companies. In: *Procedia Manufacturing* 51 2020, S. 1478–1484.
- Krockert, M.; Matthes, M.; Munkelt, T.; Völker, S.: Generierung realitätsnaher Testdaten für die Simulation von Produktionen. In: Franke, J. und Schuderer P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021, S. 565–574.
- Koller, D., Friedman, N.: *Probabilistic graphical models: principles and techniques*: MIT press 2009.
- Neapolitan, R. E.: *Learning Bayesian networks*. In: Berkhin, P.; Caruana, R. und Wu X. (Hrsg.): *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. KDD07: The 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Jose California New York (USA) 2007, S. 1.
- Neuberg, L. G.: *Causality: Models Reasoning and Inference by Judea Pearl* Cambridge University Press 2000. In: *Econ. Theory* 19 (2003), S. 675–685.
- Radford, A.; Narasimhan, K.; Salimans, T.; Sutskever, I.: *Improving language understanding by generative pre-training* 2018.
- Radford, A.; Wu, J.; Child, R.; Luan, D.; Amodei, D.; Sutskever, I.; others: *Language models are unsupervised multitask learners*. In: *OpenAI blog* 1 (2019), S. 9.
- Schuh, G.; Stich, V.: *Produktionsplanung und -steuerung. 4., überarbeitete Auflage* (Hrsg.): Berlin, Heidelberg Springer Vieweg (VDI-Buch) 2012.
- Taillard E., "Benchmarks for basic scheduling problems", *EJOR* 64(2):278-285, 1993. <http://mistic.heig-vd.ch/taillard/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>, letzter Zugriff: 10.07.2023.
- Tyugu, E., & Tyugu, E. K.: *Algorithms and architectures of artificial intelligence* (Vol. 159) (Hrsg.): IOS Press 2007.
- Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J.; Jones, L.; Gomez, A. N. et al.: *Attention Is All You Need*, 2017. <http://arxiv.org/pdf/1706.03762v5>, letzter Zugriff: 27.06.2023.
- Völker, S.; Döring, T.; Munkelt, T.: *The Generation of Large Test Data for the Empirical Analysis of Heuristic Procedures for Production Planning and Control*. In: Fleischmann, B.; Lasch, R.; Derigs, U.; Domschke, W. und Rieder, U. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2000. Selected Papers of the Symposium on Operations Research (OR 2000)*, Dresden, 9.-12. September, 2000. Berlin: Springer, S. 266–270.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Automatisierte Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten im Rahmen einer Rückwärtssimulation

Automated Execution and Evaluation of Simulation Experiments in the Context of Backward Simulation

Madlene Leißau, Christoph Laroque
Westfälische Hochschule Zwickau, Zwickau (Germany),
{Madlene.Leissau, Christoph.Laroque}@fh-zwickau.de

Abstract: Manufacturing processes are increasingly driven by new product requirements, innovation, and cost efficiency. As a result, researchers are exploring new techniques and tools to optimize operational production planning. One such tool is backward-oriented discrete event simulation (SimBack), which has shown great potential in this field. However, the process of conducting numerous simulation runs required for backward simulation is often time and resource-intensive, which limits its efficiency. To address this challenge, this paper presents an approach for automated execution and evaluation of simulation experiments in the context of a backward-oriented discrete event simulation approach for scheduling and capacity planning. The authors demonstrate their approach using a simulation model of the Semiconductor Manufacturing Testbed 2020 (SMT2020).

1 Motivation

Der effiziente Ablauf von Produktionsprozessen ist für die Produktionsplanung und -steuerung unabdingbar. Dementsprechend können Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung und die daraus resultierenden Anpassungen unerwartete Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems haben und zu einer Fehlallokation von monetären und zeitlichen Ressourcen führen. Planer und Entscheidungsträger müssen einen systematischen Ansatz zur Planung und Steuerung des Ressourcenbedarfs entwickeln, um ein bestimmtes Produktionsprogramm und einzelne Aufträge in einer bestimmten Menge und einem festgelegten Zeitrahmen zu einem garantierten Fertigstellungstermin zu erreichen.

In der Halbleiterindustrie besitzen Produktionssysteme und -prozesse im Vergleich zu anderen Branchen ein überdurchschnittlich hohes Maß an Komplexität und werden weiterhin an Komplexität gewinnen (Bureau et al. 2006, S. 739; Mönch et al. 2011,

S. 193; Mönch et al. 2013, S. 1f.). Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte dokumentieren eine steigende Produktvielfalt, kleinere Losgrößen und eine sich schneller ändernde Produktpalette, während die Verbindungen zwischen Anlagengruppen durch die zunehmende Automatisierung ansteigen und somit Produktionsplanung und -steuerung erschweren. Mögliche, für die Planung relevante Abhängigkeiten resultieren beispielsweise aus beschränkten Anlagenkapazitäten, stochastischen Bearbeitungs-, Umrüst-, Warte- und Transportzeiten, einer vorbeugenden Instandhaltung, Rüstwechseln oder (dynamischen) Zeit- und/oder Kapazitätsbeschränkungen in Warteschlangen beziehungsweise entlang mehrerer Produktionsstufen (Lendermann et al. 2020, S. 1862).

Während im Laufe der Jahre kontinuierlich Anwendungsstudien zu Methoden der rückwärtsgerichteten Simulation erschienen (u. a. Jain et al. 1989; Watson et al. 1993 und 1995; Jain/Chan 1997; Mejtsky 2007; Okubo/Mitsuyuki 2021), werden in Laroque et al. (2021 und 2022) vielversprechende Ergebnisse gemäß einem methodischen Ansatz zur Rückwärtssimulation unter den Spezifika der Halbleiterindustrie und unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse beschrieben. Die Anwendung mehrerer Simulationsmodelle und eine Reihe von Experimenten zeigen, dass eine Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung ein leistungsfähiges Werkzeug zur operativen Produktionsplanung darstellen kann. Die kombinierte Ausführung des Simulationsmodells kann jedoch in Abhängigkeit von der Komplexität und Dimension des zu betrachtenden Entscheidungs- und Planungsproblems sehr zeitaufwändig und ressourcenintensiv sein, wodurch sich im Kontext der Entwicklung und Implementierung eines operativ einsetzbaren Entscheidungsunterstützungswerkzeugs ein Forschungsbedarf ergibt. Darüber hinaus blieben die zugrunde liegenden Daten und Informationen (bspw. Reihenfolge der Aufträge) in den bisherigen Arbeiten weitgehend unverändert (im Sinne einer Optimierung). Entsprechend werden die Potenziale von Simulationsmodellen zur zielgerichteten Datengenerierung und -auswertung sowie Anwendung resultierender Erkenntnisse bisher kaum genutzt.

Im vorliegenden Beitrag soll anhand des Semiconductor Manufacturing Testbed 2020, kurz SMT2020, in Form des Low-Volume/High-Mix Simulationsmodells (Kopp et al. 2020a) ein Ansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation vorgestellt werden. Nach einer kurzen Darstellung des wissenschaftlichen Stands der Technik sowie einer ausführlichen Erläuterung des prinzipiellen Lösungsansatzes mit dem Simulationswerkzeug AutoSched AP und der Open-Source-Entwicklungsplattform KNIME werden erste Experimentiererergebnisse im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse beschrieben. Die Zusammenfassung des Beitrags beschreibt das zukünftige Vorgehen der Autoren in Bezug auf die Entwicklung und Implementierung einer auf maschinellem Lernen basierenden Entscheidungsunterstützung für die operative Produktionsplanung in der Halbleiterindustrie.

2 Rückwärtssimulation

Als Ergänzung zu existierenden Methoden (bspw. gemischt-ganzzahlige Optimierung) gewinnen Methoden und Werkzeuge simulationsgestützter Optimierung für produzierende Unternehmen in vielen Branchen und insbesondere in

der Halbleiterindustrie immer mehr an Bedeutung (Block et al. 2017; Lendermann et al. 2020, S. 1861f.). Im direkten Vergleich werden bei existierenden Methoden der gemischten-ganzzahligen Optimierung oft nur recht einfache und abstrakte Modelle eingesetzt, um die benötigte Rechenzeit in angemessenen Grenzen zu halten, während mit der diskreten ereignisorientierten Simulation (DES) sehr viel komplexere Modelle bearbeitet werden können.

Im Allgemeinen werden die Modelle zur diskreten ereignisorientierten Simulation einzeln oder in Kombination mit Heuristiken im Rahmen der simulationsgestützten Optimierung zur Untersuchung von zeitlich vorwärtsgerichteten Entscheidungs- und Planungsproblemen verwendet. Ein Ansatz der diskreten ereignisorientierten Simulation in Bezug auf zeitlich rückwärtsgerichtete Entscheidungs- und Planungsprobleme wird in der Literatur als Rückwärtssimulation beschrieben und konkretisiert sich durch die Umkehrung der Ablauflogik der Simulation mitsamt der implementierten Steuerungs- und Prioritätsregelverfahren und die rückwärtsgerichtete Ausführung der Simulationsläufe selbst. Für eine Validierung der Lösungsmenge aus dem Planungsschritt der rückwärtsgerichteten Simulation ist eine anschließende Validierung des Ergebnisses mittels einer vorwärtsgerichteten Simulation anzuschließen. Eine solche Kombination einer rückwärts- und vorwärtsgerichteten Simulation soll nachfolgend als kombinierte Ausführung im Sinne der Rückwärtssimulation (SimBack) verstanden werden.

Nach Jain und Chan (1997, S. 775) lassen sich anknüpfend an eine rückwärtsgerichtete Ausführung einer Simulation und einer anbindenden Validierung fundierte Aussagen über zu erreichende Zielgrößen im Kontext zugesagter Liefertermine treffen. Die Rückwärtssimulation ist ergo ein recht effizientes Werkzeug für die Implementierung der Verfahrensweisen einer (einfachen) Rückwärtsterminierung und kann als (stochastische) Rückwärtssimulation die Lösungsqualität eines herkömmlichen Produktionsplanungs- und Terminierungsmechanismus verbessern. Darüber hinaus werden die Vorteile der Ausführungsgeschwindigkeit simulationsbasierter Terminierungsansätze (bspw. gegenüber optimierenden Verfahren) wirksam (Jain/Chan 1997, S. 775).

3 Simulation als Instrument zur zielgerichteten Datengenerierung und -auswertung

Die Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung eines Simulationsmodells kann bei komplexeren Szenarien ebenfalls sehr zeitaufwändig und ressourcenintensiv sein. Die (vorwärtsgerichtete) Zeitfortschreibung in bestehenden Simulationswerkzeugen und die daraus resultierenden Transformationsschritte in Bezug auf Eingabe- und Ergebnisdaten bedingen bisher eine manuelle Anpassung sowie Durchführung einzelner Konfigurationen der vorwärts- beziehungsweise rückwärtsgerichteten Simulationsläufe.

Die Autoren schlagen nachfolgend einen konkreten Lösungsansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente mit dem Simulationswerkzeug AutoSched AP und der Open-Source-Entwicklungsplattform KNIME vor. KNIME als Entwicklungsumgebung bietet hierbei die Möglichkeit, wahlweise vollständig in einer Low- beziehungsweise No-Code-Umgebung und/oder einer bevorzugten Programmiersprache zu arbeiten.

Für die Implementierung des in diesem Beitrag vorgeschlagenen Lösungsansatzes bedienen sich die Autoren an dem umfangreichen Spektrum zur Verfügung stehender Bausteine (Nodes) und ergänzen die bestehenden Funktionalitäten punktuell durch Python-Skripte.

3.1 Modellumkehrung

Das Semiconductor Manufacturing Testbed 2020, kurz SMT2020, nach Kopp et al. (2020a) beinhaltet vier Simulationsmodelle, die die Komplexität moderner Fabriken in der Halbleiterindustrie hinreichend genau abbilden sollen und als eine Aktualisierung beziehungsweise Erweiterung der MIMAC-Simulationsmodelle betrachtet werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Modelle geben, beispielsweise, Kopp et al. (2020a) sowie Kopp et al. (2020b). Darüber hinaus können die Modelle (AutoSched AP-Modelle und Rohdaten) unter <https://p2schedgen.fernuni-hagen.de/> frei heruntergeladen werden.

Für die Implementierung des in diesem Beitrag vorgeschlagenen Lösungsansatzes wählen die Autoren das Low-Volume/High-Mix Simulationsmodell (Dataset 2) mit über 900 Maschinen (*STN*) gemäß 105 Maschinentypen (*STNFAM*) verteilt auf 11 Funktionsbereiche (*STNGRP*) und 10 Produkttypen (*PART*) mit Arbeitsplänen (*ROUTE*) und dazugehörigen Operationen (*STEP*) im Umfang zwischen 242 Operationen für Produkttyp 5 und 585 Operationen für Produkttyp 3 (Kopp et al. 2020a). Die konkrete Modellumkehrung erfolgt über die Maschinenliste (*tool.txt*), die Arbeitspläne (*route_{1-10}.txt*) und die zu betrachtende Auftragsliste (*order_{...}.txt*).

In der Maschinenliste stehen Fragestellungen rund um die Einplanung der Aufträge auf die Maschinen eines Maschinentyps (*FWLRANK*) und danach einer Einplanung auf den entsprechenden Maschinen selbst (*RULE*) im Vordergrund. Die Einplanung nach einer reinen Priorisierung von Aufträgen beziehungsweise Lösen, beispielsweise nach höherer Priorität (*rank_HP*), ist beizubehalten. Im Ergebnis werden die priorisierten Aufträge infolge der Rückwärtssimulation in der Tendenz zwar später eingelastet, können die zugrunde liegenden Plandaten (Due Dates) wegen ihrer Priorisierung in den erforderlichen Operationen jedoch noch immer innerhalb eines akzeptablen Zeitrahmens (hier $\pm 48h$) erfüllen. Demgegenüber ist eine Einplanung nach dem kritischen Verhältnis (*rank_CR*), also dem Verhältnis der Restzeit gegenüber den Plandaten und der verbleibenden Prozesszeit, im Kontext der Rückwärtssimulation aufgrund der fehlenden Bezugsgröße zu verwerfen.

Während sich die Transformation der Eingabedaten in den Arbeitsplänen in erster Linie auf die Umkehrung der erforderlichen Operationen fokussiert, beispielsweise von Operationsnummer 242 zu Operationsnummer 1 für Produkttyp 5, sind Definitionen einer Zuordnung im Sinne von Nacharbeiten (Rework) oder Zeitschleifen (Critical Queue Time) und einer Zuordnung einer eindeutigen Maschinenabhängigkeit eines Auftrages für Operationen auf demselben Maschinentyp umzukehren. Die Definition einer Maschinenabhängigkeit für einen Auftrag in Operation 247 für Operation 270 ist beispielsweise im Zuge der Transformation der Eingabedaten in den Arbeitsplänen invers in Operation 270 für Operation 247 festzusetzen.

Auf Basis der Plandaten kann eine Einlastung der Aufträge anhand der zu betrachtenden Auftragsliste stattfinden. Die Einlastung erfolgt gemäß dem Ziel der

Nullverspätung über alle Aufträge und der zeitlichen Realisierbarkeit der zugesagten Plandaten ausgehend vom spätestmöglichen Fertigstellungstermin.

Die von den Autoren umgesetzte Automatisierung der hier beschriebenen Transformationsschritte für die rückwärtsgerichtete Simulation bietet allen voran für Planer und Entscheidungsträger, die nicht über hinreichende Kenntnis der Simulation und speziell Rückwärtssimulation verfügen, zahlreiche Vorteile. Die intuitive Benutzeroberfläche (Abbildung 1) ermöglicht es dem Anwender, die zu betrachtende Auftragsliste auszuwählen und den Planungshorizont selbst festzulegen, wobei der Transformationsprozess beliebig oft ausgeführt werden kann. Eine Tabellenansicht bietet die Möglichkeit die erfolgte Transformation der selektierten Auftragsliste nachzuvollziehen.

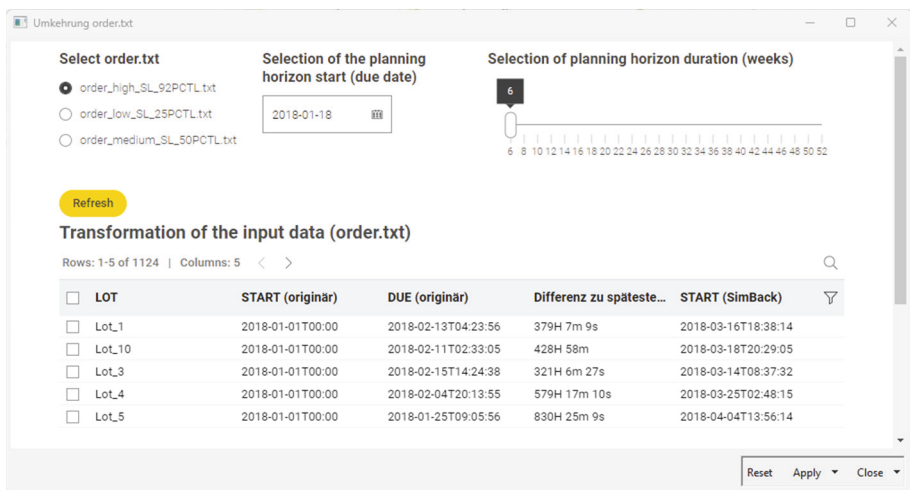


Abbildung 1: Benutzeroberfläche zur Auswahl der zu betrachtenden Auftragsliste und des Planungshorizonts

3.2 Versuchsanplanung und -durchführung

Beziehentlich eines Experimentdesigns im Kontext einer Rückwärtssimulation verfügen bestehende Simulationwerkzeuge über unzureichende Möglichkeiten; die Transformation von Ergebnisdaten eines rückwärtsgerichteten Simulationslaufs und der nachkommenden Validierung anhand einer vorwärtsgerichteten Simulation ist ein maßgeblicher zu automatisierender Teilschritt, um eine integrierte Validierung der Ergebnisse der Rückwärtssimulation sicherzustellen.

Für die Durchführung der in diesem Beitrag vorgesehenen Sensitivitätsanalyse implementieren die Autoren eine prototypische Benutzeroberfläche zur Auswahl und Definition von Faktorkonfigurationen. Über Radiobuttons kann zunächst eine Auswahl getroffen werden, ob sich die Auswahl auf den gesamten Produktionsprozess oder nur auf bestimmte Funktionsbereiche beziehen soll, die über eine Doppelliste auszuwählen sind. Darüber hinaus können Anwender außerdem schrittweise die Auswahl einer prozentualen oder ganzzahligen Fixierung der Maschinenanzahl für alle Maschinentypen der ausgewählten Funktionsbereiche bestimmen.

4 Ergebnisse

Mit dem vorgeschlagenen Lösungsansatz (Abbildung 3) zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation versuchen die Autoren folgenden Ziele zu erreichen. Entsprechend adressieren die Autoren zunächst die Schwierigkeit der Versuchsdurchführung im Kontext eines hinreichend sorgfältigen Experimentdesigns und die Notwendigkeit einer Automatisierung der Rückwärtssimulation. Die Implementierung eines übergreifenden Lösungsansatzes zur Automatisierung der Modellumkehrung, Versuchsplanung und -durchführung sowie Datenaufbereitung- und -analyse führen dabei nicht nur zu einer Zeitersparnis für die Simulationsexperten, sondern ermöglichen zumindest prinzipiell auch die Ausführung von Experimenten durch geschulte Anwender. Die Experimentierreihe selbst erreicht durch das Ausbleiben manueller Eingriffe eine signifikante Effizienzsteigerung und geringere Fehleranfälligkeit.

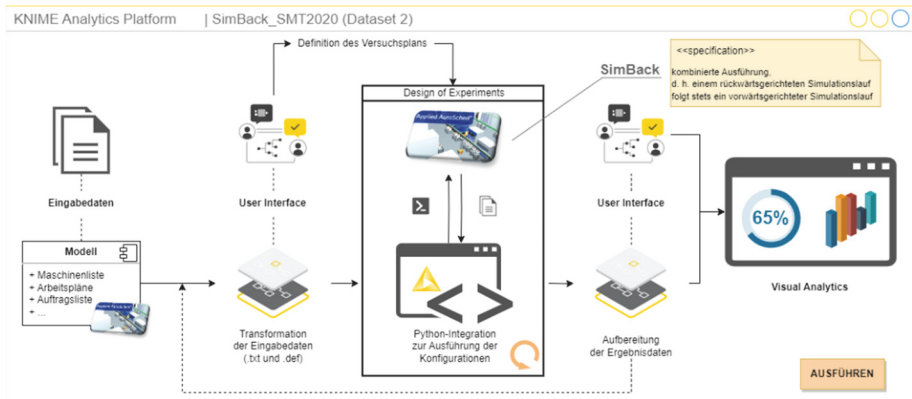


Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Lösungsansatzes

Der Ansatz der Rückwärtssimulation soll mittels des beschriebenen Vorgehens auf ein komplexeres Modell übertragen werden und die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Lösungsansatzes zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation im Grundsatz dargestellt werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse haben die Autoren den Wirkungsraum in Bezug auf die Maschinenanzahl für die Maschinentypen ausgewählter Funktionsbereiche (*Dielectric, Diffusion, Dry_Etch, Litho, Litho_Met*) und eine Verringerung dieser um die Hälfte untersucht. Die resultierenden 57 Versuchsläufe (inklusive Ausgangskonfiguration) wurden anhand des entwickelten Lösungsansatzes auf einem Octa-Core-Prozessor Intel Xeon Silver 4215 und einem physischen Arbeitsspeicher von 256 GB gestartet. Gemäß einer Vergleichbarkeit der Ergebnisdaten startet der Lösungsansatz mit der Prozessierung des originären (vorwärtsgerichteten) Simulationslaufs, genannt *VWS0*, und schließt die Rückwärtssimulation im Sinne der kombinierten Ausführung des Simulationsmodells an. Der zugrunde liegende Planungshorizont wurde zunächst auf acht Wochen festgelegt.

Die Ergebnisse des Testexperimentes zeigen über alle Konfigurationen hinweg, dass die Rückwärtssimulation in Bezug auf die zeitliche Realisierbarkeit der zugesagten Plandaten ausgehend vom spätestmöglichen Fertigstellungstermin vielversprechende Ergebnisse gegenüber der Einschleusplanung der originären Simulation erzielen kann. Entsprechend weisen die Versuchsläufe gemäß einer Abweichung von ± 12 Stunden bis zu ± 96 Stunden im Vergleich zu den zugrunde liegenden Plandaten überwiegend eine höhere zeitliche Realisierbarkeit auf (Abbildung 4).

Adherence to due dates

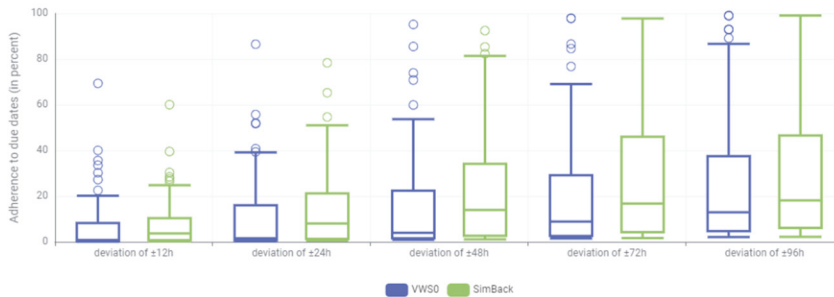


Abbildung 4: Auswertung des Testexperimentes über alle 57 Konfigurationen

5 Ausblick

Simulationsexperimente erfordern Aufwand und Zeit. Selbst, wenn ein bestehendes Modell nur mit neuen Parametern aktualisiert werden muss, ist die Laufzeit für die Ausführung der Simulation selbst notwendig (Pappert/Rose 2022). Planer und Entscheidungsträger müssen heute kurzfristig Produktionspläne entwickeln, die die Lagerbestände so gering wie möglich halten und gleichzeitig die Qualitätsanforderungen erfüllen und die zugesagten Liefertermine einhalten. Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Optimierung des gesamten Planungsprozesses, wofür übergreifende Optimierungsmethoden erforderlich werden (Laroque et al. 2022). Ziel dieses Beitrags war es, einen Ansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation als eine erste Komponente eines größeren Gesamtkonzeptes vorzustellen.

Danach beabsichtigen die Autoren ein zielgerichtetes Data-Farming als Ausführung großer Mengen von Faktorenkonfigurationen als Teil der Trainingsphase von Verfahren des maschinellen Lernens zu verwenden, um insgesamt ein leistungsfähiges Werkzeug zur Unterstützung operativer Entscheidungen bei Termin- und Reihenfolgeplanung in der Halbleiterindustrie (Abbildung 5) bereitzustellen. Dies soll sicherstellen, dass der Lösungsansatz für Entscheidungsträger unmittelbar anwendbar ist und der Zeit- und Ressourcenbedarf minimiert wird, der mit der Verwendung der Verfahren verbunden ist.

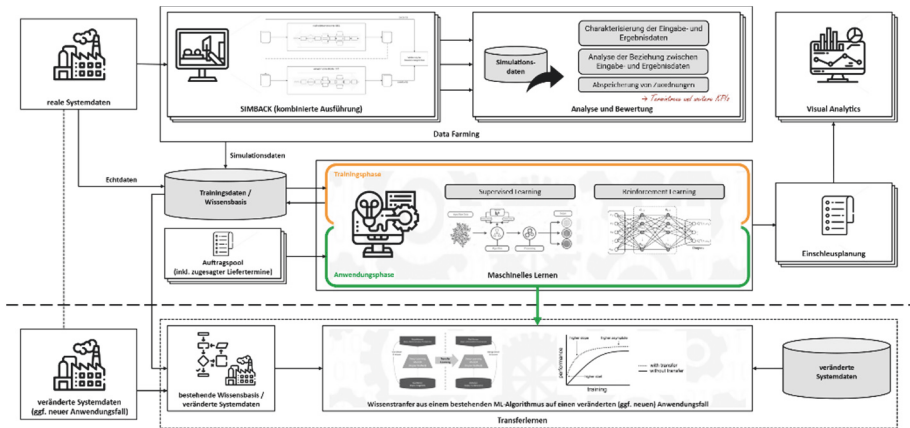


Abbildung 5: Lösungskonzept für ein leistungsfähiges Werkzeug zur Unterstützung operativer Entscheidungen bei Termin- und Reihenfolgeplanung

Literatur

- Block, C.; Kuhlenkötter, B.; Frank, T.; Burges, U.: Online-Materialflussimulationen zur Entscheidungsunterstützung in der PPS. *productivITY* 22 (2017) 1, S. 28–30.
- Bureau, M.; Dauzère-Pérès, S.; Mati, Y.: Scheduling Challenges and Approaches in Semiconductor Manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes* 39 (2006) 3, S. 739–744.
- Jain, S.; Barber, K.; Osterfeld, D.: Expert Simulation For Online Scheduling. In: *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference (WSC)*, Washington (DC), USA, 04.-06. Dezember, 1989, S. 930–935.
- Jain, S.; Chan, S.: Experiences with backward simulation-based approach for lot release planning. In: *Andradóttir, S.; Healy, K.J.; Withers, D.H.; Nelson, B.L. (Hrsg.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC)*, Atlanta (GA), USA, 7.-10. Dezember, 1997, S. 773–780.
- Kopp, D.; Hassoun, M.; Kalir, A.; Mönch, L.: SMT2020—A Semiconductor Manufacturing Testbed. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 33 (2020a) 4, S. 522–531.
- Kopp, D.; Hassoun, M.; Kalir, A.; Mönch, L.: Integrating Critical Queue Time Constraints Into SMT2020 Simulation Models. In: *Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.-H.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2020b.
- Laroque, C.; Leißau, M.; Scholl, W.; Schneider, G.: Rückwärtssimulation als Instrument zur Produktionsplanung - Erkenntnisse aus einer praxisbezogenen Fallstudie. In: *Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 295–304.
- Laroque, C.; Leißau, M.; Scholl, W.; Schneider, G.; Preuß, P.: Experimentelle Analyse zur Einschleusplanung in der Halbleiterfertigung mittels einer stochastischen Rückwärtssimulation. In: *Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.;*

- Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): Proceedings Langbeiträge ASIM SST 2022. Wien: ARGESIM Verlag 2022, S. 49–56.
- Lendermann, P.; Dauzere-Peres, S.; McGinnis, L.; Monch, L.; O'Donnell, T.; Seidel, G.; Vialletelle, P.: Scheduling and Simulation in wafer fabs: Competitors, Independent Players or Amplifiers? In: Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.-H.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), S. 1861–1874.
- Mejtsky, G.J.: A metaheuristic algorithm for simultaneous simulation optimization and applications to traveling salesman and job shop scheduling with due dates. In: Henderson, S.G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J.D.; Barton, R.R. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (WSC), Washington (DC), USA, 9.-12. Dezember, 2007.
- Mönch, L.; Fowler, J.W.; Dauzère-Pérès, S.; Mason, S.J.; Rose, O.: A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of Scheduling* 14 (2011) 6, S. 583–599.
- Mönch, L.; Fowler, J.W.; Mason, S.J.: *Production Planning and Control for Semiconductor Wafer Fabrication Facilities: Modeling, Analyses, and Systems*: Springer New York 2013.
- Okubo, Y.; Mitsuyuki, T.: Study on Job Shop Scheduling for Keeping the Requested Shipping Sequence by Production System Modeling and Backward Simulation. In: *Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions*: IOS Press 2021, S. 203–212.
- Pappert, F.S.; Rose, O.: Using Data Farming and Machine Learning to Reduce Response Time for the User. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 11.-14. Dezember, 2022.
- Watson, E.F.; Medeiros, D.J.; Sadowski, R.P.: Generating Component Release Plans with Backward Simulation. In: Evans, G.W.; Mollaghasemi, M.; Russel, E.C.; Biles, W.F. (Hrsg.): Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference (WSC), Los Angeles (CA), USA, 12.-15. Dezember, 1993, S. 930–938.
- Watson, E.F.; Medeiros, D.J.; Sadowski, R.P.: Order-release planning using variable lead times based on a backward simulation model. *International Journal of Production Research* 33 (1995) 10, S. 2867–2888.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Requirements for a ML- and Platform-based Simulation Service

Anforderungen für einen ML- und plattformgestützten Simulationservice

Pierre Grzona, Technische Universität Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Intralogistik, Chemnitz (Germany), pierre.grzona@mb.tu-chemnitz.de

Mai Thi Yen, Westsächsische Hochschule Zwickau, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Zwickau (Germany), yen.mai.thi@fh-zwickau.de

Florian Zumpe, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany), florian.zumpe@iwu.fraunhofer.de

Marc Münnich, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany), marc.muennich@iwu.fraunhofer.de

Abstract: Today, with the rapid development of new technologies, many industries have adopted them to enhance their performance. Among them, additive manufacturing is known as a rapid manufacturing process that can produce products in a single step, reducing time to market. Since 2019, COVID-19 has caused significant negative impacts on the global supply chain (SC), including shortages of medical goods. Therefore, an agile and flexible medical SC is required. While machine learning (ML) methods are known for using big data to gain valuable insights through forecasting, simulation enables unlimited if-then scenarios to make informed decisions in optimising SC operations. The combination methods between ML and simulation in solving SC issues has not been investigated at a sufficient level. This paper, therefore, aims to explore the advantages of coupling ML with simulation techniques in the SC field by conducting a systematic literature review. Through an expert survey, requirements for a ML and platform-based simulation service will be investigated from a technical point of view to develop a suitable use case in the future.

1 Introduction

During and after the COVID-19 pandemic, the global SC was unable to show its resilience under high uncertainty and volatile circumstances (Durugbo and Al-Balushi, 2022). Existing digital collaboration networks could only contribute to a limited extent to the creation of new value networks in times of crisis and did not have the functionality and intelligence to move directly from acute emergencies (e.g.,

medical products) to production and distribution. Therefore, the question of SC resilience has recently become a frequently investigated topic. At the same time, ML and simulation techniques have been well-known for their manifold applications in multiple domains. The leverage of data in solving problems related to the SC field is also increasingly focused on by academic and industrial bodies. Especially in an uncertain environment, the sustainability and resilience of SC can be improved by using emerging technologies based mainly on data-driven methods (Kazancoglu et al., 2023). Therefore, this paper focuses on answering the question of how the combination of ML and simulation can benefit the SC domain.

Initially, a review of resilient SC approaches are conducted to formulate the concrete research questions for the paper. Based on this, a systematic literature review of ML and simulation applications in the context of SC is conducted. Research questions are then derived and subsequently answered by conducting an online survey with domain experts. The responses from the survey are analysed using the Analytic Hierarchical Process (AHP) assessment method. Finally, the results from the survey analysis and its limitations will be presented and discussed. An outlook on further work will be given afterwards.

2 Resilient SC review and problem statement

2.1 Resilient SC approaches

During the last COVID-19 pandemic, multiple SC models and approaches were developed and employed to enhance the resilience of SC network. By Jain et al. (2017) and Belhadi et al. (2021), SC resilience refers to the supply chain's adaptive capacity to deal with the disruptive event and to swiftly regain its previous performance level. Durugbo and Al-Balushi (2022) reviewed 250 journals from 1996 to 2021, and explored four dimensions of SC management strategies to deal with crises are (1) crisis supplies with essential services, (2) timely response with recovery, (3) safety with security, and (4) traceability with transparency. Also, in Burgos and Ivanov (2021), the resilience of SC during a crisis scenario has been emphasized via a case study of a food retail SC in the COVID-19 pandemic. Noticeably, this study developed and used a discrete-event simulation (DES) model to examine SC operations and performance dynamics with the help of anyLogistix digital SC. With an exploratory review of 162 papers from the SCOPUS database, Naz et al. (2022) figure out that the resiliency of SC has attracted researchers to overcome the risks and disruptions to reach successful project management post COVID-19. In this study, the importance of artificial intelligence (AI) usage in creating a sustainable and resilient SC has been mentioned. Regarding the resilience of SC models for crisis scenarios, various research has been investigated. Among them, Oliveira et al. (2019) indicate the metrics for resilience factors in SC network and Pavlov et al. (2018) introduce an SC resilience assessment using a hybrid fuzzy-probabilistic approach. Regarding Ivanov et al. (2023), the viability of SC network should be considered for the survivability of society in a long-term crisis. The concept of an intertwined supply network has also been introduced as an entirely interconnected SC that enables the secure provision of goods and services for society and the market. In conclusion, it is obvious that ML and simulation are not new to the SC domain. These techniques prove their worthiness

and feasibility in these applied cases with the improvement of SC performance via various dimensions.

With the support of new technologies and methods, such as data-based analysis and modelling, the optimization process of SC network has significantly improved. Therefore, research to understand more about how and to what extent data-driven methods, namely ML and simulation, are applied to SC is necessary.

2.2 Problem statement

Started in June 2022, KISS (KI-gestütztes Rapid Supply Network) is a research project that focuses on creating an AI-supported semantic network platform to support the generation of new SC using rapid production strategies in turbulent market environments, e.g. due to a supply shortage of medical(-related) products in crises such as the COVID-19 pandemic (InfAI). AI-supported analyses and simulations are then supposed to determine the optimal production and SC configuration according to certain criteria and enable direct networking with producers on the platform. Therefore, the following general question is formulated:

- *How can simulation and ML be integrated into digital platforms to enhance the resilience of SC networks for additive manufacturing of medical(-related) products? (GQ 1)*

This general research question requires to review various aspects of simulation, ML learning and SC. This paper aims to understand how ML and simulation combination can be employed in to the digital platform, under these 2 sub-questions:

- *What are the applications of ML and simulation in SC? (RQ 1)*
- *How can the application of simulation and ML be estimated regarding the worthiness of the underlying task? (RQ 2)*

This paper provides the necessary basis for further investigation of the general research question. In the following section, this framework is concretised accordingly. The next section presents the research methodology.

3 Methodical approach

3.1 Systematic literature review process

To answer the first research question about simulation and ML applications in the SC field, a systematic literature review is conducted with the following reviewing protocol. The results from this review are categorized following the 9 Rights (9R) dimensions of logistics (Amount, Product/Object, Location, Time, Quality, Cost, Packaging, Information, and Ecological Footprint) that have been investigated in the previous paper (Münnich et al., 2023) and the four coupling cases according to VDI 3633 Part 12 (2020), including (I) Sequential Simulation follows ML, (II) Sequential ML follows Simulation, (III) Hierarchical ML embedded in Simulation and (IV) Hierarchical Simulation embedded in ML.

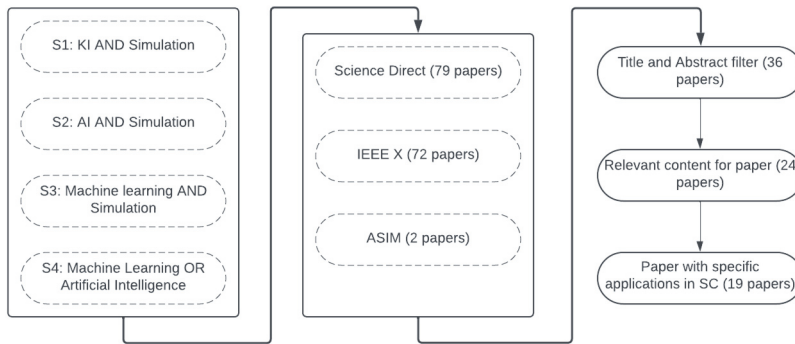


Figure 1: Systematic literature review template

3.2 Online survey

Online surveys are a tool for gaining empirical knowledge in a specific field. These could be carried out either as qualitative surveys with the help of open-ended questions (Braun et al., 2021) or as quantitative surveys with the possibility to assess probability sampling, standardized measurement and the data analysis (Fowler, 2014).

Additional characteristics of online surveys are their efficiency and economic advantages, as well as proven and stringent guidelines for their execution (van Selm and Jankowski, 2006; Punter et al., 2003). Common steps for online survey studies are Study definition, Study design, Implementation and Execution, Analysis, Discussion of results (Döring and Bortz, 2016; Punter et al., 2003).

To answer *RQ 2* a study concept was defined to determine two aspects:

- Explore the knowledge of simulation and ML from simulation specialists.
- Understand the importance of criteria to carry out either simulation or ML.

The items were transferred into a 5-level unipolar discrete rating scale questionnaire (Jonkisz et al., 2012) to assess the specific knowledge of these phases and techniques. The scale is based on the five-stage model of Dreyfus and Dreyfus (1980). It was extended by an additional category by a ‘no knowledge’-stage and the stages ‘mastery’ and ‘expertise’ were mapped in the survey category expert.

A guideline commonly used in Germany for conducting simulation studies for logistics and production systems is provided in VDI 3633 Part 1 (2014). This guideline describes a general approach for simulation studies based on Rabe et al. (2008) with separate simulation studies in several phases. These phases formed the basis for the assessment of the specific simulation knowledge. Three categories were identified to assess the level of knowledge of ML techniques. For the assessment of the coupling cases of simulation and ML, four cases were identified according to VDI 3633 Part 12 (2020) and adapted in the previous paper (Münnich et al., 2023).

The study itself was conducted with LimeSurvey. To validate the study procedure and feasibility, a pre-test was done with two experts and non-experts. The survey was initially spread at a simulation workshop conference in Magdeburg in March 2023 and later through an expert working group on simulation in production and logistics.

3.3 Analytical hierarchy process

The approach to answer *RQ 2* is based on the multi-criteria decision method of the AHP according to Saaty (1994). The goal is to obtain a weighting of the criteria for simulation and ML worthiness. The method helps with the decomposition of a problem into sub-problems and the subsequent aggregation of the partial results into an overall decision. Both rationally calculable and intuitive factors can be included in the decision-making process and quantitatively compared. The problem is mapped into a hierarchical structure and the elements (evaluation criteria and alternatives) are compared in pairs. To perform these comparisons a uniform scale is used that includes values from one (equal importance) to nine (extremely high importance), which was picked up in the questionnaire. The result of this is the assignment of certain priorities (weightings) to the evaluation criteria and alternatives. These results are aggregated, allowing the contribution of each alternative to the overall objective to be determined. The AHP was used here exclusively for weighting the criteria. A characteristic of the procedure is the integrated check of the determined weighting matrices for criteria and alternatives for their consistency. If a predefined consistency value is exceeded, the pair comparisons, the determination of the weighting vectors and the consistency check should be performed again. This leads to the reduction of wrong decisions due to potential contradictions in the evaluation. According to VDI 3633 Part 1 (2014) the simulation worthiness criteria must be considered before the simulation study. Table 1 shows the criterion for ML worthiness derived out of expert interviews.

Table 1: Criteria (only ML) for the pairwise comparison with AHP

Items	Code
Complexity of the problem, nature of the task, is this problem a recurring task?	AHP_M1
Data availability and nature How is data acquisition done, is it recurrent or is data collected only once? Are the possibilities of reference measurement available?	AHP_M2
Data complexity, is there a large number of input variables? In general, how much data is available?	AHP_M3
Exhaustion of analytical methods, are existing analytical methods exhausted or can no longer be performed efficiently?	AHP_M4
open question	text_ml

4 Study Results and Further Implication

4.1 ML and simulation coupling applications in SC

After conducting a systematic literature review with four different queries S1, S2, S3, and S4 (Figure 1), the results are presented in Table 2. Based on the review of the ML and simulation integration method from VDI 3633 Part 12 (2020), there are currently four main coupling cases between ML and simulation. This summary, therefore, collects and clusters the results according to these four coupling cases and the previously mentioned 9R dimensions of logistics.

Table 2: Current applications of ML and simulation in SC. (CC - coupling case, Sim - simulation method, DES - discrete-event, ABS - agent-based, NUM - Numerical, HY - Hybrid, RF - Reinforcement Learning, NN - Neural Networks, BDT - Boosted Decision Tree, kNN - k-Nearest-Neighbours)

Source	The Right	CC	Sim	ML Algorithm
(Illgen et al., 2020)	Time, Product	I	DES	kNN
(Azab et al., 2021)	Time, Quality	I	DES	BDT, NN
(Wojtusiak et al., 2012)	Time, Cost	III	ABS	Inferential Theory of Learning
(Bauer, 2022)	Time, Cost	II	DES	RF, kNN
(Steinbacher et al., 2022)	Time	II	ABS	RF, Deep-Q-Learning
(Nagahara et al., 2019)	Time,	I	DES	NN (RankNet, ListNet)
(Lima et al., 2022)	Ecological Footprint, Cost	III	DES	NN
(Rabe et al., 2017)	Amount, Cost	IV	DES	RF
(Nagahara et al., 2020)	Time	III	DES	NN (ListNet)
(Creighton and Nahavandi, 2002)	Time, Cost, Amount	II; III	DES	RF
(Ortiz-Barrios et al., 2023)	Time	IV	DES	Random Forest
(Vijay et al., 2022)	Time, Location, Information	III IV	DES	Coloured Petri-Nets
(AboElHassan and Yacout, 2021)	Location, Cost	III	DES	RF
(Feng et al., 2022)	Quality	II	NUM	BDT
(Bergmann et al., 2015)	Time, Information	II	DES	NN
(Qi et al., 2019)	Quality	II	NUM	NN
(Sobottka et al., 2019)	Time, Cost, Ecological Footprint	III	HY	NN
(Eriksson et al., 2022)	Time, Cost, Ecological Footprint	III	DES	Deep RF
(Pappert and Rose, 2021)	Time	II	NUM, ABS	NN

The following findings can be derived from the systematic literature review:

- DES is the dominant simulation technique used in most research.
- Production planning was the most considered application process in SC when it came to ML and simulation methods.
- The Right Time is one of the most used dimensions from the review.
- Coupling cases II and III were applied more frequently than other coupling cases.
- RF and NN are the two most popular ML techniques used in SC field.

4.2 Results of the online survey and AHP

The online survey was conducted between 7 March 2023 and 7 May 2023, 16 completed the knowledge part, including eight simulation worthiness criteria questions and five ML worthiness questions. On average, around 80% of the participants considered themselves experienced users or experts according to different

phases of the simulation study by VDI 3633 Part 1 (2014). This picture turned around for ML and the coupling cases of simulation and ML. Less than 20% of the participants found themselves experienced users or experts, slightly less for the different coupling scenarios.

Figure 2 shows the results of the simulation worthiness criteria pairwise comparison and its average calculated. In total, seven participants answered the questionnaire. Two of them (P01&P05) were excluded from the average calculation (AV) because of their high consistency ratios (greater than 10%), which indicates an inconsistent result regarding randomly chosen values (Saaty, 1994). Additionally, two participants commented with an additional special requirement for visualisation and supported this with concrete scenarios.

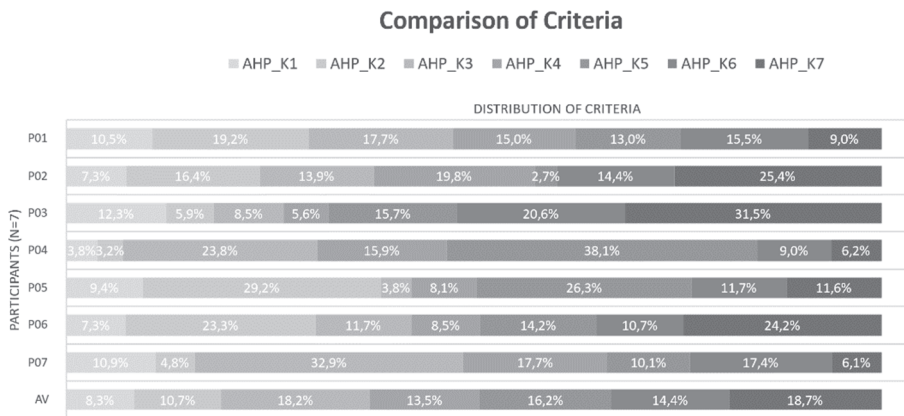


Figure 2: Analysis result of the AHP in relation to simulation worthiness

The ML worthiness criteria, on the other hand, are not presented here due to insufficient (two) numbers of complete and consistence answers.

5 Conclusion

This research result leads to the answers for the formulated *RQs* mentioned in section 2. The review of ML and simulation coupling applications in SC indicates that coupling cases II and III are the most used, with DES being the preferred simulation technique. RF and NN are the most frequently used ML techniques to improve SC performance. Many applications are related to production planning, with the goal of reducing time. Moreover, the AHP analysis revealed that all criteria are equally important for evaluation and implementation in a web-based platform service. However, there was no result for the ML criteria due to the lack of samples. Further research is required in the next phase to explore the task-oriented approach to coupling ML and simulation in SC.

Despite the valuable results obtained, there are several limitations. First of all, the limited number of samples may lead to a lack of data for the AHP analysis. Secondly, most participants in the survey had extensive simulation knowledge but little ML

expertise. Therefore, assessing ML worthiness may lead to mis-interpretative results. Thirdly, ML worthiness criteria are not established by official standards but are compiled from expert knowledge. The assessment of these criteria must be dealt with in future research. Finally, like Bicalho-Hoch et al. (2022), no clear ranking of the simulation worthiness criteria could be derived from the collected data, while these criteria are highly dependent on the participant and use case.

From the conclusions of this study, several possible research directions will be considered in the next phase of the project. They include (1) improving the sample size of empirical research, (2) developing a concrete use-case for the proof of concept, (3) establishing a framework for coupling simulation and ML to enhance the SC resilience.

Acknowledgement

The project on which this report is based was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under the funding code 01MK22001B.

References

- AboElHassan, A.; Yacout, S.: Embedding Reinforcement Learning in Simulation. In: 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2021, Vasteras, Sweden, 2021, pp. 1–6.
- Azab, E.; Nafea, M.; Shihata, L.A.; Mashaly, M.: A Machine-Learning-Assisted Simulation Approach for Incorporating Predictive Maintenance in Dynamic Flow-Shop Scheduling. *Applied Sciences* (2021), pp. 1–17.
- Bauer, D.: Lernende ereignisbasierte Optimierung der Produktionssteuerung für die komplexe Werkstattfertigung, Dissertation, 2022.
- Belhadi, A.; Kamble, S.; Jabbour, C.J.; Gunasekaran, A.; Ndubisi, N.O.; Venkatesh, M.: Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological forecasting and social change* (2021).
- Bergmann, S.; Feldkamp, N.; Straßburger, S.; Hinze, U.: Abbildung von Steuerungslogiken durch maschinelles Lernen für die Simulation von Produktionssystemen. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in production and logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, pp. 481–490.
- Bicalho-Hoch, A.L.; Ozkul, F.; Wittine, N.; Wenzel, S.: A Tool-Based Approach to Assess Simulation Worthiness and Specify Sponsor Needs for SMEs. In: 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 2022, pp. 1818–1829.
- Braun, V.; Clarke, V.; Boulton, E.; Davey, L.; McEvoy, C.: The online survey as a qualitative research tool. *International Journal of Social Research Methodology* 24 (2021) 6, pp. 641–654.
- Burgos, D.; Ivanov, D.: Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation research. Part E, Logistics and transportation review* 152 (2021).
- Creighton, D.C.; Nahavandi, S.: Optimising discrete event simulation models using a reinforcement learning agent. In: *Proceedings of the WSC, San Diego, CA, USA, 2002*, pp. 1945–1950.

- Döring, N.; Bortz, J.: *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016.
- Dreyfus, S.E.; Dreyfus, H.L.: *A five-stage model of the mental activities involved in directed skill acquisition* 1980.
- Durugbo, C.M.; Al-Balushi, Z.: *Supply chain management in times of crisis: a systematic review*. *Management Review Quarterly* (2022).
- Eriksson, K.; Ramasamy, S.; Zhang, X.; Wang, Z.; Danielsson, F.: *Conceptual framework of scheduling applying discrete event simulation as an environment for deep reinforcement learning*. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 955–960.
- Feng, Q.; Maier, W.; Möhring, H.-C.: *Application of machine learning to optimize process parameters in fused deposition modeling of PEEK material*. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 1–8.
- Fowler, F.J.: *Survey research methods*. Los Angeles, Calif.: SAGE 2014.
- Illgen, B.; Sender, J.; Flügge, W.: *Digital assistance system for target date planning in the initiation phase of large-scale projects*. *Procedia CIRP* 93 (2020), pp. 1031–1036.
- InfAI: *KISS - KI-gestütztes Rapid Supply Network*, Institut für Angewandte Informatik. Online verfügbar unter <https://semper-ki.org/>, zuletzt geprüft am 12.05.2023.
- Ivanov, D.; Dolgui, A.; Blackhurst, J.V.; Choi, T.-M.: *Toward supply chain viability theory: from lessons learned through COVID-19 pandemic to viable ecosystems*. *International Journal of Production Research* 61 (2023) 8, pp. 2402–2415.
- Jain, V.; Kumar, S.; Soni, U.; Chandra, C.: *Supply chain resilience: model development and empirical analysis*. *International Journal of Production Research* 55 (2017) 22, pp. 6779–6800.
- Jonkisz, E.; Moosbrugger, H.; Brandt, H.: *Planung und Entwicklung von Tests und Fragebogen*. In: Moosbrugger, H.; Kelava, A. (Hrsg.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012, pp. 27–74.
- Kazancoglu, I.; Ozbiltekin-Pala, M.; Mangla, S.K.; Kumar, A.; Kazancoglu, Y.: *Using emerging technologies to improve the sustainability and resilience of supply chains in a fuzzy environment in the context of COVID-19*. *Annals of Operations Research* 322 (2023) 1, pp. 217–240.
- Lima, F.; Nonogaki, L.K.; Chang, J.; Massote, A.A.: *Estimation of Energy Consumption in Manufacturing Lines Using Machine Learning into Industry 4.0 Context*. In: *2022 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*, Portland, OR, USA, 2022, pp. 1–7.
- Münnich, M.; Zumpe, F.; Grzona, P.: *Simulation und Maschinelles Lernen in Supply Chains*. In: Krull, C.; Commerell, W.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): *ARGESIM Report 22, ASIM Mitteilung* 186 2023, pp. 15–18.
- Nagahara, S.; Serita, S.; Shiho, Y.; Zheng, S.; Wang, H.; Chida, T.; Gupta, C.: *Toward data-driven modeling of material flow simulation: automatic parameter calibration of multiple agents from sparse production log*. In: *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering*, Hong Kong, 2020, pp. 1096–1101.
- Nagahara, S.; Sprock, T.A.; Helu, M.M.: *Toward data-driven production simulation modeling: dispatching rule identification by machine learning techniques*. *Procedia CIRP* 81 (2019), pp. 222–227.

- Naz, F.; Kumar, A.; Majumdar, A.; Agrawal, R.: Is artificial intelligence an enabler of supply chain resiliency post COVID-19? An exploratory state-of-the-art review for future research. *Operations Management Research* 15 (2022) 1-2, pp. 378–398.
- Oliveira, J.B.; Jin, M.; Lima, R.S.; Kobza, J.E.; Montevechi, J.A.B.: The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints. *Simulation Modelling Practice and Theory* 92 (2019), pp. 17–44.
- Ortiz-Barrios, M.; Arias-Fonseca, S.; Ishizaka, A.; Barbati, M.; Avendaño-Collante, B.; Navarro-Jiménez, E.: Artificial intelligence and discrete-event simulation for capacity management of intensive care units during the Covid-19 pandemic: A case study. *Journal of business research* 160 (2023).
- Pappert, F.S.; Rose, O.: Reducing Response Time with Data Farming and Machine Learning. *SNE Simulation Notes Europe* 31 (2021) 2, pp. 87–94.
- Pavlov, A.; Ivanov, D.; Dolgui, A.; Sokolov, B.: Hybrid fuzzy-probabilistic approach to supply chain resilience assessment. *IEEE Transactions on Engineering Management* 65 (2018) 2, pp. 303–315.
- Punter, T.; Ciolkowski, M.; Freimut, B.; John, I.: Conducting on-line surveys in software engineering. In: 2003 International Symposium on Empirical Software Engineering, 2003. ISESE 2003. Proceedings.: IEEE 2003, pp. 80–88.
- Qi, X.; Chen, G.; Li, Y.; Cheng, X.; Li, C.: Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives. *Engineering* 5 (2019) 4, pp. 721–729.
- Rabe, M.; Dross, F.; Wuttke, A.: Combining a discrete-event simulation model of a logistics network with deep reinforcement learning. In: *Metaheuristics: Proceeding of the MIC and MAEB 2017 Conferences, Spain, 2017*, pp. 765–774.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*: Springer Berlin Heidelberg 2008.
- Saaty, T.L.: How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces* 24 (1994) 6, pp. 19–43.
- Sobottka, T.; Kamhuber, F.; Faezirad, M.; Sihm, W.: Potential for Machine Learning in Optimized Production Planning with Hybrid Simulation. *Procedia Manufacturing* 39 (2019), pp. 1844–1853.
- Steinbacher, L.M.; Ait-Alla, A.; Rippel, D.; Düe, T.; Freitag, M.: Modelling Framework for Reinforcement Learning based Scheduling Applications. *IFAC-PapersOnLine* 55 (2022) 10, pp. 67–72.
- van Selm, M.; Jankowski, N.W.: Conducting Online Surveys. *Quality and Quantity* 40 (2006) 3, pp. 435–456.
- VDI 3633 Part 1: Simulation of systems in materials handling, logistics and production: Fundamentals. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2014.
- VDI 3633 Part 12: Simulation of systems in materials handling, logistics, and production: Simulation and optimisation. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2020.
- Vijay, G.; Peter, R.; Elliot, B., S.; Nilmin, W.: Taxonomy, Tools, And A Framework For Combining Simulation Models With AI/ML Models. In: 2022 Annual Modeling and Simulation Conference, San Diego, CA, USA, 2022, pp. 18–29.
- Wojtuskiak, J.; Warden, T.; Herzog, O.: Machine learning in agent-based stochastic simulation: Inferential theory and evaluation in transportation logistics. *Computers & Mathematics with Applications* 64 (2012) 12, pp. 3658–3665.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Grundlayouts für modulare Montagesysteme – ein simulationsbasierter Vergleich

Basic Layouts for Modular Assembly Systems – a Simulation-based Comparison

Sören Bergmann, Steven Ehrle, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany),
soeren.bergmann@tu-ilmenau.de, steven.ehrle@tu-ilmenau.de

Abstract: The article discusses the challenges posed by increased individualization of products, shorter product life cycles, and external factors on the flexibility of modern production systems. In particular, flexible workshop-oriented manufacturing principles are being implemented to replace or supplement traditional assembly lines, with various terms such as "modular assembly" and "matrix production" etc. used to describe similar concepts. The article presents these concepts under the umbrella term of modular production or assembly systems, which utilize adaptable workstations and autonomous vehicles to transport production orders between stations. The design of such systems is crucial to their performance, with considerations such as task allocation, material supply, and fleet sizing requiring complex interplay. The article compares traditional matrix layouts with alternative options, such as single-lane pathways and non-matrix layouts like honeycomb or star shapes, using simulation-based analysis to evaluate their potential impact on system performance.

1 Einleitung

Neue Herausforderungen, basierend auf verstärkter Individualisierung von Produkten, kürzeren Produktlebenszyklen, externen Einflüssen etc. (Koren, 2010) führen zu erhöhten Anforderungen bezüglich der Flexibilität moderner Produktionssysteme. Insbesondere die Endmontage muss flexibel auf sich ändernde Bedingungen und Anforderungen reagieren können, ohne dabei die Wirtschaftlichkeit der Montage der Produkte bzw. der diversen Produktvarianten zu vernachlässigen (Feldkamp et al., 2019; Spath, D. 2013; El Maraghy et al., 2013).

Hierbei kommt die klassische Linienfertigung mitunter an ihre Grenzen und wird durch flexiblere, eher werkstatorientierte Fertigungsprinzipien abgelöst oder ergänzt. Einige Piloten sind insbesondere in der Automobilindustrie zu verzeichnen (Göppert et al., 2018), wobei verschiedene Akteure ähnliche Konzepte, in mitunter nur im Detail abweichenden Spielarten, unterschiedlich bezeichnen. So sind in der Literatur Begriffe wie „modulare Montage“ (Audi AG, 2019), „Flexi-Line“ (Mayer, 2018) oder

„Full-Flex-Werk“ (Daimler AG, 2018) bzw. auch „Matrix Production“ (Greschke et al., 2014) zu finden. Das gemeinsame Ziel all dieser Ansätze ist es, mehrere Produkttypen bzw. deren Varianten im selben Produktionssystem effizient zu fertigen und bei Einführung neuer Produkte bestenfalls keinen langwierigen Um- oder Neubau erforderlich zu machen. Bestenfalls können neue Produkte sogar ohne Unterbrechung des laufenden Betriebs eingeführt werden (Feldkamp et al., 2022). Im Rahmen dieses Beitrags werden diese Konzepte unter dem Sammelbegriff modulare Produktions- bzw. Montagesysteme subsumiert.

Solche modularen Produktions- bzw. Montagesysteme setzen sich aus anpassungsfähigen Arbeitsstationen (Fertigungsinseln) mit ihren spezifischen Werkzeugen und geschultem Personal zusammen, an denen ein oder meist mehrere unterschiedliche Produktions- bzw. Montagetätigkeiten durchgeführt werden können. Die Produktionsaufträge, in der Automobilendmontage die Karossen, werden dabei mittels fahrerloser Transportsysteme (FTS) transportiert. Hierbei wird das konkrete Routing durch das System der Fertigungsinseln ad hoc, unter Berücksichtigung der vorhandenen technischen Restriktionen und der individuellen Aufgabenpakete der zu fertigenden Produkte bzw. Produktvarianten sowie dem aktuellen Status des Gesamtsystems bestimmt (Feldkamp et al., 2019; Hüttemann et al., 2016).

Neben der offensichtlichen großen Herausforderung der Steuerung solcher Systeme ist das Systemdesign entscheidend für die Performance des gesamten Produktionssystems. Beim Design eines modularen Produktionssystems sind verschiedene, in sich bereits komplexe Gestaltungsdimensionen in ihren Wechselwirkungen zu betrachten. So ist u.a. die Zuteilung der Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln, d.h. welche Produktionsschritte sind auf welchen Fertigungsinseln möglich, ein entscheidender Punkt (Bergmann, 2022). Weiterhin muss die Materialversorgung der Fertigungsinseln und die Dimensionierung der Flotte von fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) betrachtet werden.

In den allermeisten Fällen werden die Fertigungsinseln bisher in einer Schachbrett-/Matrixanordnung mit oft vollständigen zweispurigen Wegesystemen im Hallenlayout positioniert (Greschke et al., 2014). Im Rahmen dieses Beitrags soll mit Hilfe eines simulationsbasierten Vergleichs untersucht werden, ob es hier generell Verbesserungspotential gibt bzw. ob weitere gleichwertige oder sogar bessere Alternativen denkbar sind. Hierbei sollen zum einen abweichende Wegetopologien für Matrixlayouts, z.B. einspurige Wege oder unvollständige Wegenetze untersucht werden. Zum anderen werden abweichende Grundlayouts, z. B. eine Anordnung der Fertigungsinseln in Form von Bienenwaben oder in einem Sternlayout, geprüft. Zu untersuchen ist hierbei insbesondere die erreichbare Systemperformance (Ausbringungsmengen, Auslastungen etc.) aber auch die Auslastung der Wege, das Stauverhalten der FTF oder der Platzbedarf des Wegenetzes etc.

Der Aufbau des Beitrags gliedert sich wie folgt: Die Einleitung führt in das Thema des Beitrags ein und verdeutlicht die Motivation. Anschließend wird kurz der Stand der Forschung sowie die notwendigen theoretischen Grundlagen zum Themenkomplex modularer Produktionssysteme, insbesondere dem Layout dieser, dargestellt. Aufbauend wird im Hauptteil des Beitrags zunächst ein grundlegendes Vergleichsszenario einer realitätsnahen modularen Produktion sowie verschiedene Layoutvarianten vorgestellt. Dabei wird, wenn nötig, auf Annahmen und

Restriktionen eingegangen. Im Weiteren werden die Ergebnisse erster Simulationsexperimente an den einzelnen Layoutvarianten kurz vorgestellt. Ebenso erfolgten eine kritische Betrachtung sowie der Versuch einer ersten Verallgemeinerung der Erkenntnisse. Der Beitrag wird abgeschlossen mit einem Fazit sowie einem Ausblick auf weitere interessante Forschungsmöglichkeiten im Kontext der modularen Produktion.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In modularen Montagesystemen, die im Rahmen dieses Beitrags weitestgehend synonym für eine Reihe ähnlicher Begriffe verwendet werden, wird das bisher oft in der Endmontage vorherrschende Prinzip der Fließfertigung durch eine eher werkstatororientierte Montage abgelöst. Solche Systeme können dabei oft auch als cyber-physische Systeme aufgefasst werden, wobei die Nutzung von Daten z. B. Sensordaten und automatisierten Transportsystemen eine gewisse dezentrale autonome Steuerung erst ermöglicht, die jederzeit auf die individuelle Situation des Montagesystems reagieren kann (Kern und Bauernhansl, 2020; Burggräf et al., 2020).

Charakteristisch für solche Systeme sind insbesondere:

- entkoppelte Arbeitsstationen (Fertigungsinseln) mit individuellen Taktzeiten,
- mehrere Tätigkeiten / Fähigkeiten je Fertigungsinsel,
- Redundanzen von Fähigkeiten auf verschiedenen Fertigungsinseln und
- flexible Materialflüsse mittels FTS (Fahrerlose Transportsysteme).

Beim Design von modularen Montagesystemen sind verschiedene Gestaltungsdimensionen zu berücksichtigen, welche oft miteinander in Wechselwirkung stehen. Hierzu gehören:

- die Zuordnung von Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln (Bergmann, 2022),
- die Gestaltung der Steuerung der Fertigungsaufträge inkl. der FTS (Feldkamp et al., 2022),
- die Planung der Materialversorgung (Fries et al., 2020) sowie
- die Verteilung und Anordnung der Fertigungsinseln (Layout).

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf dem Einfluss des Layouts auf die Performance modularer Montagesysteme, gleichwohl es erhebliche Wechselwirkungen mit anderen Gestaltungsdimensionen gibt, z.B. bei der Zuordnung von Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln.

Unter Layout wird im Folgendem das Ergebnis der Layoutplanung verstanden, also die (oft grafische) räumliche Anordnung der fertigungsrelevanten Struktur- und Funktionselementen (Schenk et al., 2014). Eine Teilaufgabe besteht in der Planung der Transportrouten und Materialflüsse, die die Systemperformance wesentlich beeinflusst (Schenk et al., 2014). Da in modularen Montagesystemen insbesondere ortsflexible Transportsysteme wie FTS zum Einsatz kommen, sind das Wegenetz und auch Puffer, sowohl an Fertigungsinseln als auch im Lager etc., besonders relevant.

Aktuell sind in dem zumeist rechteckigen Hallen matrix- bzw. schachbrettartige Anordnungen üblich, bei denen meist vollständige zweispurige in beide Richtungen befahrbare Wegenetze vorherrschen (Feldkamp et al., 2022; Schönemann et al., 2015).

Zur Bewertung der Performance von modularen Montagesystemen kann auf das breite Portfolio der Kennziffern aus dem Kontext der Fabrikplanung (Schenk et al., 2014) zurückgegriffen werden. Im Folgenden werden statische Kennziffern, wie u.a. der benötigte Flächenbedarf, die Gesamtlänge des Wegenetzes und der Anteil der Wege an der Gesamtfläche berechnet sowie mittels Simulationsexperimenten Kennziffern wie der Durchsatz, die durchschnittliche Durchlaufzeit je Produkttyp, die durchschnittliche Fahrtstrecke/Fahrtzeit je Produkt und die Auslastungen der Wege ermittelt.

3 Simulationsbasierter Vergleich von Grundlayouts anhand einer Fallstudie

Bevor verschiedene alternative Layouts mit den entsprechenden Wegenetzen betrachtet werden, soll zunächst ein Szenario für ein modulares Montagesystem eingeführt werden. Das Szenario ist so gestaltet, dass es hinreichend komplex ist und viele aus der Praxis bekannte Faktoren berücksichtigt. Gleichzeitig ist es erklärbar und kann im Rahmen eines Beitrags beschrieben werden.

So werden folgende Annahmen bzw. Eigenschaften zugrunde gelegt: die Fläche, welche für die modulare Montage verfügbar ist, beträgt max. 80x70m, es werden 16 mögliche Fertigungsinseln (mit jeweils einem eigenen Pufferbereich für 3 FTF) vorgesehen. Fertigungsinseln nehmen ca.11x11m Hallenfläche ein. Wege benötigen je Spur eine minimale Breite von 2m.

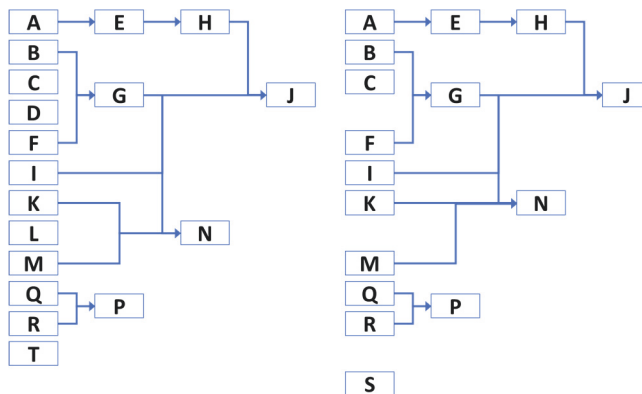


Abbildung 1: Illustration der Vorranggraphen für Produkt 1 (links) und Produkt 2 (rechts)

Die Zuordnung von Tätigkeiten zu Fertigungsinseln wurde im Voraus festgelegt und ist für alle Szenarien vergleichbar. Jeder Fertigungsinsel sind zwischen 2 und 3 verschiedene Tätigkeiten/Montageschritte zugeordnet. Darüber hinaus wurden zwei Produkttypen definiert, die gleichhäufig auftreten. Jeder Produkttyp besitzt bis zu 18 Produktionsschritte und hat einen eigenen Vorranggraphen (siehe Abbildung 1) sowie individuelle Bearbeitungszeiten.

Die FTF-Steuerung erfolgt dezentral und regelbasiert. Konkret wählen die FTF aus den möglichen Fertigungsinseln, die von den aktuell möglichen Montageschritten

abhängig sind, diejenige mit der kürzesten Warteschlange oder diejenige, die noch nicht besetzt ist. Im Falle eines Gleichstands zwischen mehreren Inseln wird die räumlich nächstgelegene Insel angefahren. Falls auch das nicht eindeutig ist, wird zufällig gewählt.

Des Weiteren wurde die Zahl von FTF und damit die Zahl der gleichzeitig im System aktiven Aufträge auf 22 gesetzt. Für die Materialversorgung wird von Warenkörben ausgegangen, welche sich von Anfang an mit auf den jeweiligen FTF befinden. Somit kann von einer expliziten Abbildung der Materialversorgung zunächst abstrahiert werden. Die Simulationszeit im Simulator Siemens Plant Simulation betrug je Experimentlauf 144h (6 Tage).

Neben der bereits erwähnten klassischen Matrixanordnung (Abbildung 2, oben links) mit vollständigen zweisepurigen Wegesystem wurden 6 weitere Layouts bzw. Wegenetzvarianten verglichen (siehe Abbildung 2). Zu bemerken ist, dass die Idee einer freien Anordnung der Stationen ohne feste Wege aufgrund der nicht gegebenen Vergleichbarkeit zunächst für diesen Vergleich verworfen wurde.

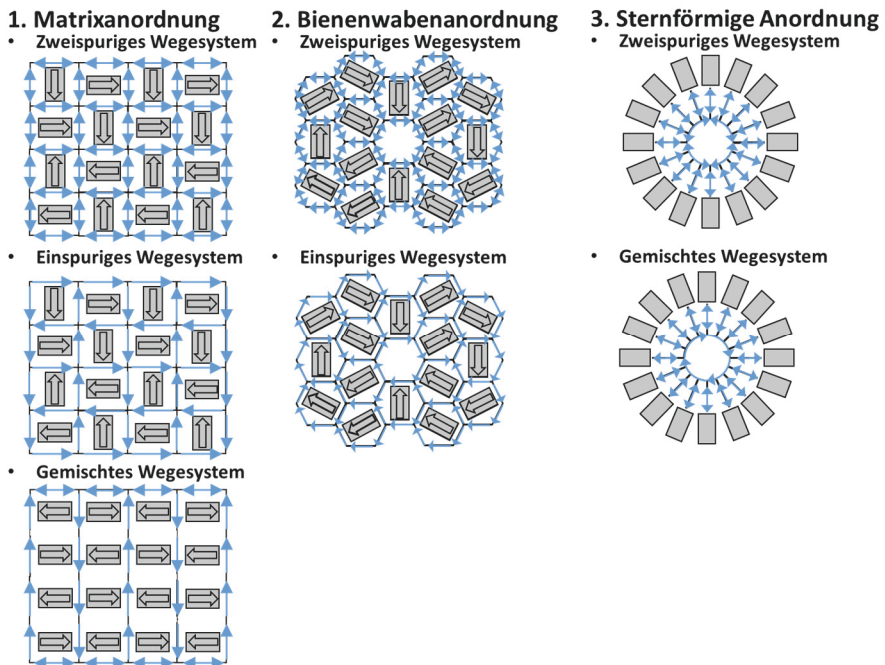


Abbildung 2: Layout- bzw. Wegenetzvarianten

Neben den offensichtlichen visuellen Unterschieden der Grundvarianten (Matrix-, Waben- und Sternanordnung) in Abbildung 2 ist insbesondere die detaillierte Ausgestaltung der Wegenetze von großem Interesse. Bei allen zweisepurigen Wegesystemen wird angenommen, dass alle Wege zwei Spuren haben und somit 4 Meter breit sind. Dies ermöglicht nicht nur Überholmanöver, sondern erlaubt auch das Begegnen von FTF auf einem Wegabschnitt. Bei allen einspurigen Wegesystemen wird dagegen angenommen, dass es sich um Einbahnstraßen handelt, um Deadlocks

zu vermeiden. Unbedingt zu beachten ist hierbei, dass es hier nicht zu Sackgassen kommen darf. Die beiden Varianten, die als "gemischte Wegesysteme" bezeichnet werden, sind spezielle Fälle, bei denen sowohl zweispurige als auch einspurige Wege im Wegenetz vorhanden sind. Bei der gemischten Matrixanordnung sind die Wege oben und unten zweispurig, während alle senkrechten Wege in der Abbildung einspurig sind. Die Richtung der einspurigen Wege ist alternierend. Bei der sternförmigen Anordnung werden im gemischten Wegesystem ebenfalls ein- und zweispurige Wege genutzt. Konkret ist hier der innere Ring einspurig befahrbar und somit eine Einbahnstraße.

Wie bereits erwähnt, können erste Kennzahlen zu den einzelnen Layouts bereits ohne Simulationsexperimente berechnet werden. Die benötigte Fläche sowie der Anteil der Wege an der Gesamtfläche unterscheiden sich teilweise erheblich (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Flächenvergleich der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten

Implementiertes Layout	Gesamt Länge / Breite	Grundfläche	Wegefläche
Matrix 2-spurig	64m / 64m	4.096 m ²	2.146 m ²
Matrix 1-spurig	54m / 54m	2.916 m ²	977 m ²
Matrix gemischt	58m / 55m	3.190 m ²	902 m ²
Waben 2-spurig	80m / 68,5m	4.385 m ²	2.221 m ²
Waben 1-spurig	68m / 58,5m	3.318 m ²	1.017 m ²
Stern 2-spurig	62m / 62m	2.907 m ²	647 m ²
Stern gemischt	62m / 62m	2.907 m ²	499 m ²

Deutlich zu sehen ist das, dass auf den ersten Blick recht ungewöhnliche Sternlayout in diesem Szenario den geringsten Flächenbedarf hat, wobei hier die im inneren entstehende Freifläche abgezogen wurde. Die praktische Skalierbarkeit dieses Layouts auf mehr Stationen ist aber zu bezweifeln. Weiterhin ist zu sehen, dass einspurige Wege in der Regel weniger Platz benötigen und dass die Wabenlayouts insgesamt eine etwas größere Fläche benötigen als die klassische Matrixanordnung. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass bei den Wabenanordnungen Randflächen (halbe Waben) negativ auffallen und dass hier eine Wabe komplett frei bleibt. Diese freien Flächen könnten in der Praxis möglicherweise anderweitig genutzt werden. Zudem kann vermutet werden, dass bei nicht rechteckigen Fertigungsinseln, idealerweise ebenfalls hexagonal gestaltet, weitere Potenziale zur Flächeneinsparung bestehen.

Mittels Simulation wurden für alle 7 Varianten weitere Kennwerte ermittelt, der Durchsatz, der durchschnittliche Fahrtweg pro Produkt sowie die durchschnittliche Fahrzeit pro Produkt kann Tabelle 2 entnommen werden. Auch bei diesen Vergleichswerten fallen deutliche Unterschiede auf.

Bei beiden sternförmigen Layouts ist ein deutlich geringerer Durchsatz zu beobachten, da es in den Simulationen zu Blockaden kam, die bis zum vollständigen Stillstand der Produktion führten. Auch das einspurige Matrixlayout erzielt etwas niedrigere Durchsatzwerte, da es gelegentlich zu Wartezeiten der FTF vor vollen Puffern kommt, die dann schwer zu umgehen sind. Eine verbesserte Steuerung der FTF bzw. Mechanismen zur Vermeidung und Behebung von Blockaden könnten diesem Problem möglicherweise entgegenwirken.

Tabelle 2: Vergleich des Durchsatzes sowie der durchschnittlichen Fahrtwege und -zeiten der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten

Implementiertes Layout	Durchsatz	Durchschnittlicher Fahrtweg	Durchschnittliche Fahrzeit
Matrix 2-spurig	170 Stk.	699,85 m	11,5 min
Matrix 1-spurig	161 Stk.	1.592,11 m	26,5 min
Matrix gemischt	171 Stk.	1.482,82 m	24,5 min
Waben 2-spurig	171 Stk.	771,12 m	13 min
Waben 1-spurig	170 Stk.	1.381,15 m	23 min
Stern 2-spurig	112 Stk.	605,04 m	10 min
Stern gemischt	116 Stk.	970,47 m	16 min

Bei zweispurigen Matrix- bzw. Wabenlayouts treten solche Effekte nicht auf, da die Wege nicht vollständig blockiert werden und Überholmanöver möglich sind. Beim gemischten Matrixlayout reicht die Möglichkeit zum Überholen auf den zweispurigen Wegen offensichtlich aus, um negative Effekte zu vermeiden.

Ein überraschendes Verhalten zeigt das einspurige Wabenlayout, bei dem trotz fehlender Überholmöglichkeiten kaum Blockaden auftreten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es oft sehr gute alternative Routen zwischen zwei Punkten gibt. Zudem wirkt sich positiv aus, dass es keine Kreuzungen mit vier Ein- bzw. Ausgängen gibt, was die Komplexität im Konfliktfall signifikant reduziert.

Allgemein ist aber zu sehen, dass die Transportzeiten sich nicht sofort auf den Durchsatz durchschlagen und daher bei der Planung nicht als Hauptkriterium dienen sollten. Im Gegensatz dazu ist das Auftreten von Blockaden ein wichtiger Faktor, welcher bei der Planung unbedingt beachtet werden muss.

Tabelle 3: Auslastung des Wegesystems der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten

Implementiertes Layout	Anzahl der Wegsegmente je Klasse				Weg-segmente
	Grün (0-449)	Gelb (450-899)	Orange (900-1349)	Rot (1350-1800)	
Matrix 2-spurig	85	13	0	0	98
Matrix 1-spurig	58	28	16	17	119
Matrix gemischt	25	25	26	10	86
Waben 2-spurig	94	20	0	0	114
Waben 1-spurig	56	28	30	0	114
Stern 2-spurig	16	16	0	0	32
Stern gemischt	13	3	0	16	32

Um hier weitere Einblicke zu ermöglichen, soll als letzte hier präsentierte Kenngröße die Auslastung der Wege betrachtet werden. Die Analyse der Auslastung der Wege, basierend auf der Anzahl der Fahrten pro Wegabschnitt, liefert weitere Einblicke in das System. Um die Auslastung der Wege besser vergleichbar zu machen, wurden alle

Wegsegmente bzw. Teilabschnitte in eine von vier Klassen eingeteilt. Die Einteilung basiert auf der Anzahl der Fahrten, die auf den jeweiligen Wegsegmenten durchgeführt wurden. Diese Klassen dienen der besseren Unterscheidung der Auslastung und ermöglichen einen Vergleich der Wege, somit können Engpässe und Überlastungen identifiziert werden. Es handelt sich um folgende Klassen: Grün 0-499 Fahraufträge, Gelb 450-899 Fahraufträge, Orange 900-1349 Fahraufträge und Rot 1350-1800 Fahraufträge. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dieser Analyse dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bei den zweispurigen Matrix- und Wabenlayouts die Auslastung der Wege insgesamt geringer ist, da die Fahrzeuge die Möglichkeit haben, zu überholen und/oder Alternativrouten zu nutzen. Bei den einspurigen Wegen sind die Auslastungswerte tendenziell höher, da Überholmöglichkeiten fehlen und die Fahrzeuge gegebenenfalls warten müssen. Interessanterweise weisen die sternförmigen Layouts, trotz der Blockaden und des geringeren Durchsatzes, niedrigere Auslastungswerte auf. Dies liegt daran, dass die Wege im Inneren des Sterns, wo die Blockaden auftreten, aufgrund des Stillstands der Produktion weniger Fahrten aufweisen. Die Wege außerhalb des Sterns hingegen sind relativ frei und haben somit niedrigere Auslastungswerte.

Bei einspurigen bzw. gemischten Matrixlayouts hingegen wird ein kleiner Teil der Wege sehr viel öfter (Orange und Rot) befahren. Es besteht die Vermutung, dass durch Anpassungen der Tätigkeitsverteilung auf den Fertigungsinseln oder Optimierung der FTF-Steuerung dieser Effekt möglicherweise gedämpft, aber wahrscheinlich nicht vollständig beseitigt werden kann. Wiederum erstaunlich robust erweist sich im Versuch das einspurige Wabenlayout, in dem zwar einige Wege eine höhere Auslastung als im zweispurigen Fall aufweisen, aber keine sehr hoch ausgelasteten Wege (Rot) auftreten. Die Visualisierung der Wegeauslastung, wie in Abbildung 3 für das einspurige Wabenlayout dargestellt, kann zusätzliche Einblicke in problematische Bereiche des modularen Montagesystems liefern.

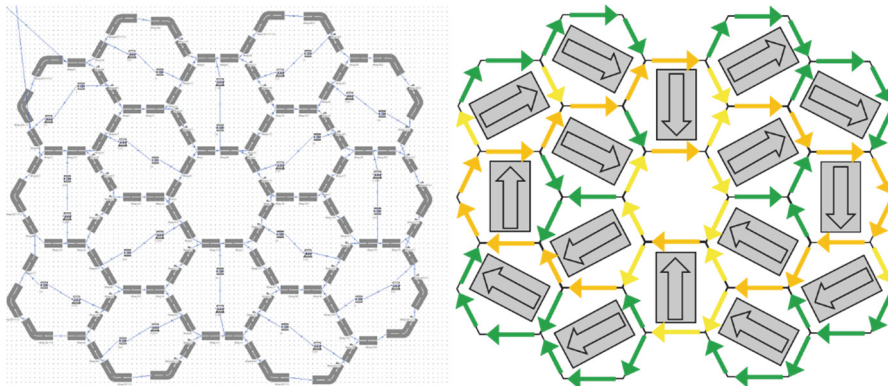


Abbildung 3: Bienenwabenanordnung mit einspurigem Wegesystem: Screenshot des Simulationsmodells (links) und Darstellung der Auslastung der Wege (rechts)

Die durchgeführten Experimente liefern keine endgültigen und allgemeingültigen Ergebnisse bezüglich der Vorteilhaftigkeit eines bestimmten Layouts für beliebige modulare Montagesysteme. Dennoch lässt sich zusammenfassend sagen, dass das

Layout neben der klassischen Matrixanordnung einen bisher unterschätzten Gestaltungsfaktor darstellt. Insbesondere das einspurige Wabenlayout zeigt in den vorgestellten Ergebnissen Potenzial. Es bietet einen guten Kompromiss zwischen Systemleistung und Platzbedarf. Wenn Randbereiche (halbe Waben) sinnvoll genutzt werden können und die Fertigungsinseln nicht auf rechteckige Grundrisse beschränkt sind, sondern idealerweise in Form von 6-Ecken gestaltet werden können, könnte das Wabenlayout eine ernsthafte Alternative zu klassischen Matrixlayouts darstellen. Auf der anderen Seite sind Layouts, die zu Blockaden neigen, wie die Sternlayouts, nicht geeignet. Falls solche Layouts gewählt werden, müssen unbedingt Mechanismen zur Vermeidung und Behebung von Blockaden implementiert werden.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein simulationsbasierter Vergleich verschiedener Layouts bzw. Wegenetztopologien für die modulare Montage durchgeführt. Es wurde ein fiktives Szenario verwendet, und obwohl die Ergebnisse sicher nicht allgemeingültig sind, konnte zumindest das Potenzial von nicht klassischen Matrixanordnungen und dem Einfluss der Gestaltung der Wegenetze gezeigt werden.

Weitere Betrachtungen zu Layouts und Wegenetztopologien für modulare Montagesysteme sind sicher angebracht. So sind zum einen sicher nicht alle möglichen Varianten betrachtet worden, z. B. wurden die frei positionierten Fertigungsinseln ohne explizites Wegenetz mangels der direkten Vergleichbarkeit ausgeschlossen, zum anderen sind um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können weitere Untersuchungen möglichst an Realweltszenarien nötig.

Weiterhin sind einige Punkte für modulare Montagesysteme offen. So wurde die Materialversorgung für modulare Montagesysteme bisher kaum untersucht. Der Beitrag ging von einer Versorgung mit einem Warenkorb aus, was in der Praxis nicht immer möglich ist. Darüber hinaus gibt es, trotz einzelner Publikationen zu diesem Thema, noch erhebliche Forschungspotenziale bei der Steuerung modularer Montagesysteme.

Schließlich wird mittelfristig ein Übergang von Teilbetrachtungen zu ganzheitlichen Ansätzen notwendig sein, da bspw. Entscheidungen wie die Aufgabenzuordnung zu Arbeitsstationen eng mit dem Layoutdesign zusammenhängen. Die Beherrschung der Komplexität solcher umfassender Ansätze stellt jedoch eine große Herausforderung dar.

Literatur

- Audi AG, 2019: Die Modulare Montage - Fertigungsinseln statt Fließband. Online verfügbar unter <https://www.audi-illustrated.com/de/smart-factory/Die-Modulare-Montage>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Bergmann, S.: Optimization of the Design of Modular Production Systems. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference, Singapore, 11.12.2022 - 14.12.2022, 2022, S. 1783–1793.
- Burgräf, P.; Dannapfel, H.M.; Adlon, T.; Schukat, E.; Kahmann, H.; Holtwiesche, L.: Modeling and evaluating agile assembly systems using mixed-integer linear programming. In: Gao, R.X.; Ehmman, K. (Hrsg.): Proceeding of the 53rd CIRP

- Conference on Manufacturing Systems 2020, Chicago, IL, USA, 1-3 July, 2020, S. 1073–1078.
- Daimler AG, 2018: Factory 56 – Mercedes-Benz Cars Increases Flexibility and Efficiency in Operations. Hg. v. Daimler AG. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/production/factory-56.html>, zuletzt aktualisiert am 15.04.2020.
- El Maraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A.: Product variety management. *CIRP Annals* 62 (2013) 2, S. 629–652.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): Tagungsband der 18. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2019: Modelling and Simulation of Modular Production Systems, Chemnitz, 18.- 20.09., 2019, S. 391–401.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Simulationsbasiertes Deep Reinforcement Learning für Modulare Produktionssysteme. In: Breiteneker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge, 25.– 27. Juli 2022, 2022, S. 65–72.
- Fries, C.; Wiendahl, H.-H.; Assadi, A.A.: Design concept for the intralogistics material supply in matrix productions. In: Mpofo, K.; Butala, P. (Hrsg.): Proceedings of the 30th CIRP Design 2020: Elsevier 2020, S. 33–38.
- Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Frei verkettete Montagesysteme. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 3, S. 151–155.
- Greschke, P.; Schönemann, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems. *Procedia 5CIRP6* 17 (2014), S. 160–165.
- Hüttemann, G.; Gaffry, C.; Schmitt, R.H.: Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly – Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook. *Procedia 5CIRP6* 52 (2016), S. 112–117.
- Kern, W.; Bauernhansl, T.: Types and Usage of Assembly Priority Charts in a Modular Assembly System. In: 24th International Conference on Production Research (ICPR 2017). Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., 2020 2020,
- Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. New York, NY: John Wiley & Sons 2010.
- Mayer, B., 2018: Ich bin ein Fan von Effizienz. Hg. v. Automobilproduktion.de. Online verfügbar unter <https://www.automobilproduktion.de/interviews-734/porsche-produktionsvorstand-reimold-wir-ziehen-alle-register-126.html?page=4>, zuletzt geprüft am 08.05.2023.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.
- Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P.; Thiede, S.: Simulation of Matrix-Structured Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015) 1, S. 104–112.
- Spath, D. (Hg.): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2013.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Automatic Generation of a Simulation Model to Support the Rescheduling of a Fixed-Layout Assembly System

Automatische Generierung eines Simulationsmodells zur Unterstützung der Umplanung einer Baustellenmontage

Harold Billiet, Rainer Stark, TU Berlin, Berlin (Germany), harold.billiet@tu-berlin.de, rainer.stark@tu-berlin.de

Abstract: Fixed-Layout Assembly (FLA) systems are used to assemble large and bulky products. These products are often unique and require customer-specific engineering and customization. FLA systems are frequently prone to disturbances and plan deviations throughout operations: delayed deliveries, incompatibility or failures of equipment, and unplanned absences of operators. Planners therefore need a simple and efficient tool to quickly forecast the impact of changes on the whole assembly system. A solution concept has been presented by the authors in a previous publication (Billiet and Stark, 2022). The authors presented a method to automatically generate a simulation model by using data concerning the products, orders and shifts from the ERP system. This paper describes the implementation of the previously presented solution concept by applying it to a FLA for the production of Large Motors and Converters (LMC) in Berlin.

1 Introduction

Fixed-Layout Assembly (FLA) systems are used to assemble large and bulky products such as ships, aircraft, locomotives, and large machinery (Guo et al., 2020). These Products are often unique and require customer-specific engineering and customization (Lotter and Wiendahl, 2012). FLA systems are frequently prone to disturbances and plan deviations throughout operations: delayed deliveries, incompatibility or failures of equipment, and unplanned absences of operators (Matt et al., 2015). These problems are due to specific characteristics of FLA systems, such as the small production volume and the high individuality and flexibility they offer to customers. Recent crises such as the Pandemic as well as military conflicts have aggravated these disturbances. Supply chains are less stable, and the availability of employees is less reliable due to illness (Allam et al., 2022). Planners currently use their experience to forecast the impact of these disturbances, as well as to compare

different rescheduling options as a reaction. This often leads to errors and unexpected situations that can spread to the whole system over time (Qian et al., 2020).

Planners therefore need a simple and efficient tool to quickly forecast the impact of changes on the whole assembly system. A solution concept has been presented by the authors in a previous publication (Billiet and Stark, 2022). This paper presented an approach using Discrete-Event Simulation (DES) to analyse the impact of changes on the assembly system. However, the high variability and flexibility of FLA systems makes them difficult to model in a DES software. For that reason, the authors presented a method to automatically generate a simulation model by using data concerning the products, orders and shifts available in the ERP system.

This paper describes the implementation of the previously presented solution concept by applying it to a FLA for the production of Large Motors and Converters (LMC) in Berlin. The first part of the paper will focus on summarizing the theoretical aspects presented in the previous publication. The next section will focus on the FLA system for LMC. The results of an analysis that examined every commonly occurring problem as well as every rescheduling possibility will be presented. The following part of the paper will focus on the software architecture used for the implementation of the solution concept.

2 Previous work

This section summarizes the theoretical aspects of the implementation based on the author's previous publication (Billiet and Stark, 2022).

2.1 Fixed-Layout Assembly Systems

The high flexibility and variability of Fixed-Layout Assembly (FLA) systems leads to constant changes and disruptions during operations. Scheduling problems include delayed deliveries of components, unplanned absence of operators, and unavailable resources (Qian et al., 2020). Problems can also occur during the assembly operation: reachability issues, collisions, and compatibility of resources. In addition to these problems, FLA planners also have to deal with last-minute customer-requirements.

At this time, planners cannot precisely predict the effects of these changes and disruptions on the whole assembly system. They currently use their experience to guess these effects, which often leads to unexpected situations (Qian et al., 2020). Planners therefore need simple and effective methods to support the rescheduling of FLA systems during operations.

2.2 Discrete-Event Simulation for Fixed-Layout Assembly Systems

Discrete-Event Simulation (DES) excels at analysing inflexible and automated systems and is today widely spread in those areas. Highly variable and flexible systems are, on the other hand, hard to model using traditional DES methods. FLA systems strongly depend on the current customer-specific orders that need to be assembled. They do not have a specific layout or machine arrangement that could be optimized (Billiet and Stark, 2022).

Using DES for the operational scheduling and decision-making of FLA systems could be an interesting approach. However, a huge drawback to this approach would be the complexity and time requirement necessary to model the current situation every time a decision needs to be made. This time-consuming task contrasts with the need for planners to quickly compare solutions when reacting to a problem.

Classic DES modelling techniques include the verification and validation of the model. Verification ensures that the model is consistent and free of errors. This includes programming mistakes as well as runtime errors during the simulation. Validation, on the other hand, makes sure that the simulation model actually runs like the real system (Mayer, G. et al. 2020).

2.3 Solution Concept

The authors presented a solution concept for a method to quickly support decision-makers for the rescheduling of FLA systems by using DES and process modelling. The idea is to use data from the ERP system concerning current customer orders and planning of resources to generate a DES-model based on the assembly processes of the products. Relevant data as well as a framework are presented in the author's previous publication (Figure 2 and 3 of the publication: Billiet and Stark, 2022).

Relevant data is imported and consolidated into an XML file by an algorithm. This data concerns orders, assembly operations, resources, parts, workers, and shifts. It is then imported and displayed in a user interface to enable the configuration of the simulation experiments that are going to be analysed. This information is then sent to a model generator, which uses it to generate a model in a DES-software. The simulation experiments are then carried out, and the results are sent back and displayed on the user interface. This method enables any user with basic IT-knowledge to quickly configure and run simulation experiments in a friendly user interface.

3 Use-Case: Large Motors and Converters

3.1 Presentation of the Use-Case

Large Motors and Converters (LMC) are machines that reach several meters and weigh up to 25 tons. Every product requires customer-specific engineering and is produced only once. The factory consists of several assembly stations, where a product can be fully assembled (see Figure 1). Resources and tools (also referred to as assets) are universal and can be shifted between the stations. Every assembled part is manufactured by an external supplier.

Depending on the product, it can take up to three days for a team of two workers to fully assemble a motor. Scheduling is planned by using Microsoft Excel: for every shift, orders are assigned to workers. This planning is then used to approximate when products will be fully assembled.



Figure 1: 3D-Model of the FLA for Large Motors and Converters

3.2 Requirements

3.2.1 Occurring Problems that need to be Analysed

The following list displays common errors ranked starting with the most frequent one:

- Supplied part was not delivered / will be delivered with delay
- Worker becomes unavailable for a specific time
- Assembly operation cannot be executed (collisions, reachability...)
- Last minute customer requirements
- Supplied part is faulty
- Resource needs to be repaired / is not available for a specific time

Part deliveries are the most frequent problems, especially because suppliers often prioritize bigger and more frequent orders instead of low volume customer specific orders. In the case of faulty parts, the issue also translates into a delayed delivery since the part needs to be sent back to the supplier. Worker availability became an important issue during the Covid-19 Pandemic. Even though it did not only concern FLA systems, it especially affected them because of the high specialisation and know-how required for the assembly of the product. Problems during operations happen when parts cannot be assembled because of feasibility issues. Because of the low production volume, it is often not possible to verify in detail if every new part could produce such issues. A rare issue is the availability of resources or assembly equipment, for example in the case of maintenance or repair.

3.2.2 Rescheduling Scenarios

When reacting to an error, planners have limited options. The most common option would be to change the current shift plan available in Microsoft Excel. By doing so, planners can prioritize other orders by changing the worker assignments of the next shifts. They can also add new worker assignments, and add shifts, for example during the night.

Another, more complex, option would be to change the sequence in which the assembly operations need to be carried out. By doing so, planners can prioritize specific assembly operations compared to other, that for example require a specific

part that was delayed, know-how that currently is not available, or assets that are currently already in use. This option is complex because planners need to be sure that the operations are still going to be feasible after altering the assembly sequence.

3.2.3 Required Functions for the Implementation

The implemented solution is operated through a user-interface, in which a decision-maker configures and analyses simulation experiments. A map of the required functions of this user-interface has been created based on the current problems and possible reactions of the factory (See Figure 2).

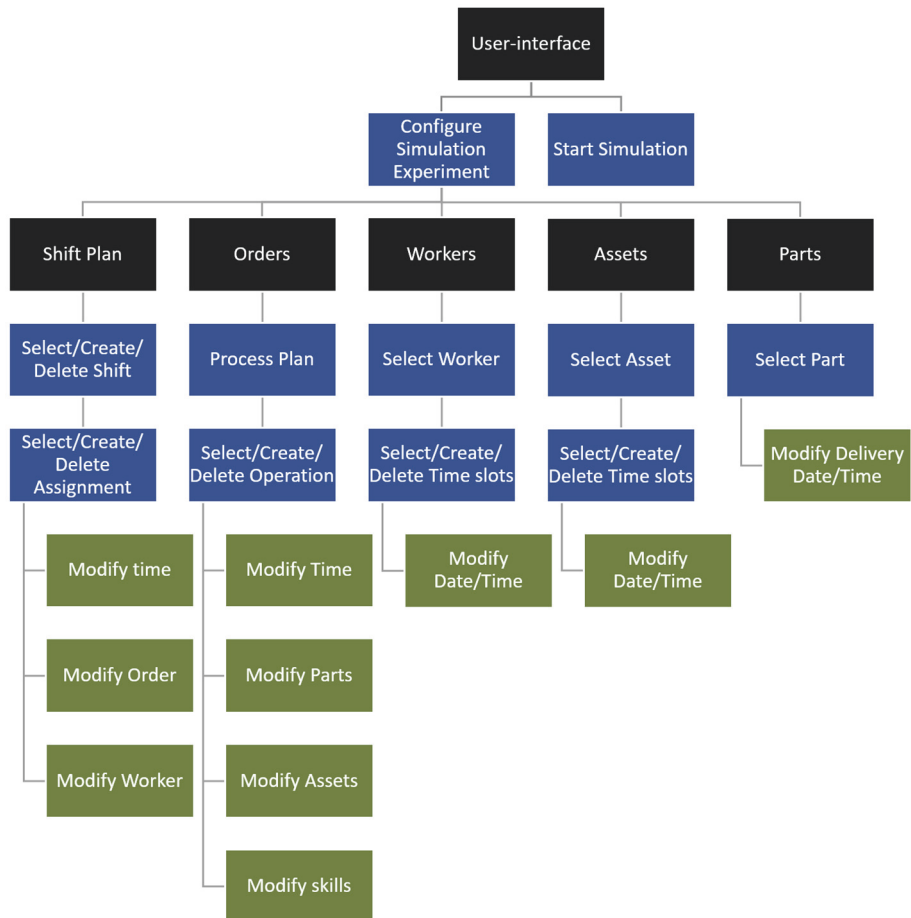


Figure 2: Required Functions of the User-Interface featuring Tabs (black), Buttons (blue) and User-Input (green)

This simulation experiment configurator enables planners to analyse the impact of problems that frequently occur during operations. For example, in the case of a delayed delivery, the decision-maker can select the concerned part and modify its delivery date and time. In the case of a last-minute customer requirement, planners

would be able to select the corresponding process plan and then add a new assembly operation. A second option for planners would be to analyse the impact of new scheduling scenarios. After learning about a delayed delivery, planners could for example change the current shift assignments to another order to minimize unnecessary waiting times.

After starting a simulation experiment, the user interface will display the simulation results. These results are generated by the simulation model and transferred back to the user-interface. The authors gave more information about the simulation results in their previous publication (Billiet and Stark, 2022).

4 Implementation of the Solution Concept

4.1 Software Architecture

The implemented solution uses a web browser as a user-interface for the configuration of simulation experiments. This method enables lots of customization possibilities since it uses the same widespread programming techniques as websites. It also allows the possibility in the future to run the whole implementation on a server and access the user-interface through the web. The complete software architecture of the implementation is shown in Figure 3.

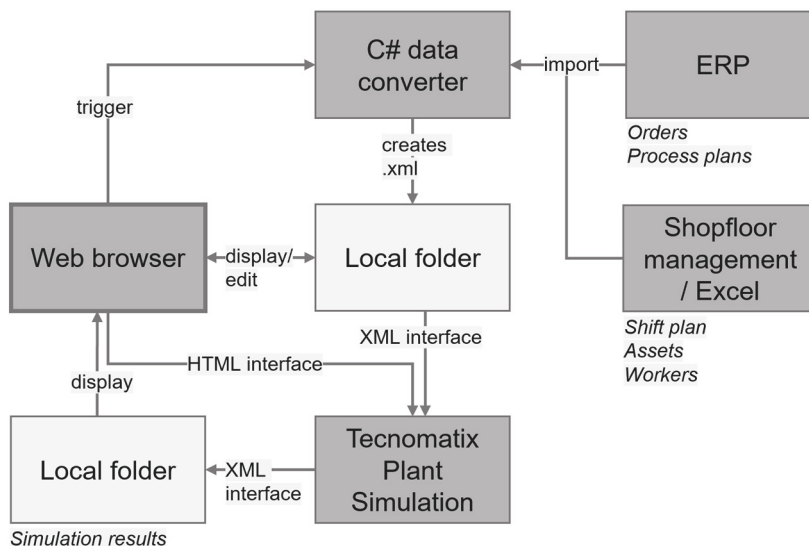


Figure 3: Software Architecture of the Implemented Solution based on the publication of Billiet and Stark (2022)

The user-interface triggers a C# algorithm, that imports data from the ERP system, as well as Microsoft Excel to convert it into a standardized local XML file.

This XML file is then imported into the user-interface to display the current state of the system. Everything including shift plans, orders, operations, assets, and workers

is displayed. The user-interface enables the modification of these elements according to its required functions (See Figure 2). This represents the configuration of a simulation experiment. The modified version of the input data is then saved locally to be accessed by the simulation.

Tecnomatix Plant Simulation (version 16.1) uses the XML interface to access that local file. After running the simulation, it uses this interface again to export the results in a standardized local XML file. This allows the web user-interface to access and display the data once it has been generated.

4.2 Implementation in Tecnomatix Plan Simulation

Plant Simulation is a widespread DES tool that allows lots of customization and expansion. It uses its own programming language (*SimTalk*), to allow the creation and execution of algorithms before, during and after a simulation experiment.

In its normal state, the implemented simulation model is empty. When the simulation is started, *SimTalk* algorithms are triggered to import data using the *XMLInterface* element. This data is stored into various tables and lists in the simulation model. Another series of algorithms is then executed to use this data to generate the simulation model, see Figure 4 of Billiet and Stark (2022).

The algorithm generating the model strongly relies on the possibility of using *SimTalk* to create new simulation elements such as *Stations*, *Connectors* and *Exporters* in the simulation frame. This is done by creating a new class in the *.UserObjects* folder, in this case a modification of the *Station* class, which is going to represent a single assembly operation. This new class is then created on the simulation frame for every operation of every order existing in the imported data using the *.duplicate* method. After duplicating the element, its various attributes such as the position (*.Coordinates3D*), assembly time (*.ProcTime*), and required assets and parts (custom attribute) are updated.

Assets and workers are then generated in the simulation as *Exporters* with a single *Service*. Thus, operations can only be processed if the required *Services* are currently available.

Parts are also modelled using *Exporters*. Since every part has a unique part number, each part *Exporter* is only used once during a simulation experiment.

The shift plan and part delivery behaviour are modelled using an algorithm that activates or deactivates the specific *Exporter*. After the generation of the simulation elements, an algorithm uses the imported shift plan and part delivery tables to define when the *Exporters* will be active. This is done using the *.ExecuteIn* method. For example, if a part will be delivered in three days, then an algorithm activating that *Exporter* will be executed in three days of the simulation time. The *.ExecuteIn* method adds events to the list of discrete Events that are being processed during the simulation experiment.

After the complete generation of the model and its events, the simulation is started without any animation to maximize computational speed. At the end of the simulation, an algorithm gathers the results (delivery reliability, workload, etc.) and exports them into an XML file using the *XMLInterfaceExport* element. Every generated element is then deleted. Since the model generator does not include any stochastic behaviour in the simulation model, no simulation replication is required.

For this implementation, the verification started during the development of the generator. By using lists and tables that can be displayed in plant Simulation, it was possible to verify and validate the data importing algorithms. Break points in the code, as well as console printing have also been used to ensure that algorithms were properly executed at the expected time. Varying the input data also made sure that the algorithms were functional.

The implemented solution in Plant Simulation thus allows the complete generation of a model and its events, as well as starting the simulation and exporting its results only by pressing the *Simulation Start* button.

4.3 Implementation of the Web-based User-Interface

The central element of the solution is the user-interface. It is coded using React, an open-source JavaScript library. This library uses JSX, an extension to the JavaScript language syntax that integrates HTML elements in the code. For the current implementation, it is especially useful since it allows the generation of elements in the user-interface depending on the imported data from the ERP and shopfloor management systems. A screenshot of the user-interface is shown in Figure 4.

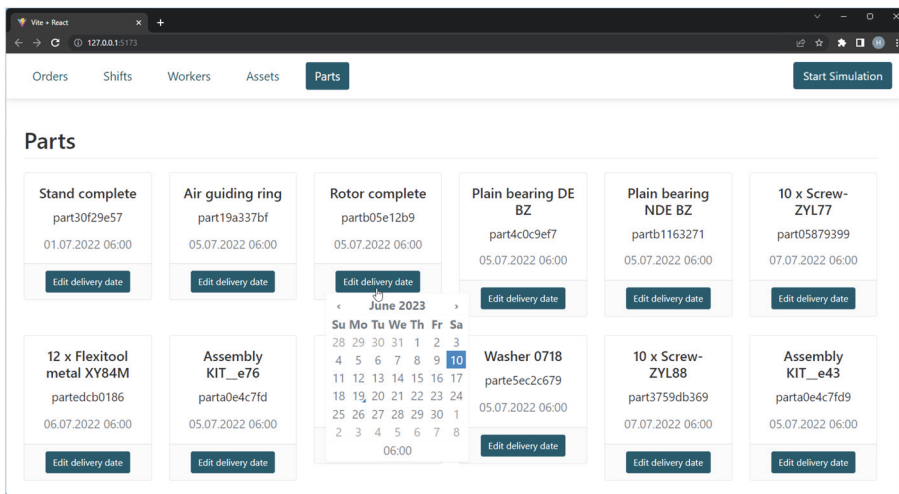


Figure 4: Implemented Web-based User-Interface for the Configuration of Simulation Experiments

The user-interface currently displays all the parts that were imported in the XML file. Every part is represented as a card with its number, description, and delivery date. In the case of a delayed delivery, the cards also feature a button that opens a date-time picker (See Figure 4, Rotor complete).

After configuring a few changes, the simulation can be started. This is made possible using the button on the right, which opens a link using the HTML interface of Plant Simulation. The used call is *SC_CallMethod*. It allows the execution of a specified method in Plant Simulation from a web browser. Note that Plant Simulation needs to be started in server mode. The results are then displayed in a new browser tab.

5 Conclusion

This paper presented the implementation of a solution concept published in a previous paper, with a use-case of a FLA system for LMC. A short description of the use-case is given, as well as a list of the required features for the solution concept (see Figure 2). This list was created by examining the cases that are going to be analysed by the simulation: disruptions and rescheduling scenarios.

The implemented solution concept uses Tecnomatix Plant Simulation for the generation and simulation of the model, together with a web-based user-interface for the configuration of the simulation experiments. Plant Simulation is started from the user-interface, runs in the background, and sends the simulation results back to the browser. Data is imported from the ERP system as well as from Microsoft Excel using a C# algorithm, that saves it locally in a standardized XML file. Users without IT or simulation knowledge are thus able to configure and analyse simulation experiments. The validity of the generated simulation model is currently dependant of the input data.

The next steps would be the integration of optimization algorithms for the automatic calculation of the best possible scheduling and rescheduling scenarios. Reinforcement learning could, for example, be a promising approach. In this case, it could also be useful to run the simulation on a server to minimize computational time. This would also facilitate the usage of the solution concept since it no longer would require a local installation of Plant Simulation and connection to the ERP and shopfloor management systems.

References

- Allam, Z.; Bibri, S.E.; Sharpe, S.A.: The Rising Impacts of the COVID-19 Pandemic and the Russia–Ukraine War: Energy Transition, Climate Justice, Global Inequality, and Supply Chain Disruption. *Resources* 11 (2022) 11, pp. 99.
- Bergmann, S.; Stelzer, S.; Strassburger, S.: Initialization of simulation models using CMSD. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, Phoenix, AZ, USA (2011), pp. 2223–2234.
- Billiet, H.; Stark, R.: A Framework for Rescheduling a Fixed-Layout Assembly System Using Discrete-Event Simulation. *2022 Winter Simulation Conference (WSC)*, Singapore (2022), pp. 1762–1771.
- Guo, D.; Lin, P.; Lyu, Z.; Ling, S.; Li, M.; Huang, G.Q.; Rong, Y.: Towards Assembly 4.0: Graduation Intelligent Manufacturing System for Fixed-position Assembly Islands. *IFAC-PapersOnLine* 52 (2019) 13, pp. 1513–1518.
- Guo, D.; Zhong, R.Y.; Ling, S.; Rong, Y.; Huang, G.Q.: A roadmap for Assembly 4.0: self-configuration of fixed-position assembly islands under Graduation Intelligent Manufacturing System. *International Journal of Production Research* 58 (2020) 15, pp. 4631–4646.
- Heilala, J.; Montonen, J.; Jarvinen, P.; Kivikunnas, S.; Maantila, M.; Sillanpaa, J.; Jokinen, T.: Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, Baltimore, MD, USA (2010), pp. 3363–3375.
- Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012.

- Matt, D.T.; Rauch, E.; Dallasega, P.; Vidoni, R.; Spena, P.R.: Synchronisierung von ETO-Fertigung und Baustellenmontage. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 1-2, pp. 9–13.
- Mayr, T.: Softwarebasierte Evaluierung menschlicher Arbeit in der industriellen Baustellenmontage. Unter Mitarbeit von Sebastian Schlund und Patrick Rupprecht, 2021,
- Negahban, A.; Smith, J.S.: Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. Journal of Manufacturing Systems 33 (2014) 2, pp. 241–261.
- Qian, C.; Zhang, Y.; Jiang, C.; Pan, S.; Rong, Y.: A real-time data-driven collaborative mechanism in fixed-position assembly systems for smart manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 61 (2020), pp. 101841.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulationsmodell für FTS in Produktionsumgebungen unter Berücksichtigung des Facility Layout Problems

Simulation Model for AGVs in Production Environments Considering the Facility Layout Problem

Lea Schmitz, Jonas Stenzel, Dept. Cognitive Robotics, Fraunhofer IML Dortmund,
Dortmund (Germany), lea.schmitz@iml.fraunhofer.de,
jonas.stenzel@iml.fraunhofer.de

Abstract: In flexible manufacturing systems, an automated guided vehicle (AGV) is often used for material transport. To simulate this transport system, a production environment with aisles and transfer points is required. The arrangement of individual areas within a production environment can be done by solving the Facility Layout Problem (FLP). However, the previous solution methods only consider individual aspects and there are hardly any solution methods that consider the entire production system with regard to the material transport system. Due to this, a FLP solving method that also considers aspects regarding the material handling system is useful so that the created production environments can be simulated and/or used in practice. Therefore, both topics - FLP and AGV - should be considered together.

1 Motivation und Problemstellung

Bei Flexiblen Fertigungssystemen (FFS) — ein bestimmter Typ von mehrstufigen Produktionssystemen (Hehenberger 2011) — wird häufig ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) für den Materialtransport verwendet (Rajotia et al. 1998, Arifin & Egbelu 2000). Eine Rolle bei der Optimierung von FTS spielt die Anordnung von verschiedenen Organisationseinheiten (OE), welche bspw. Maschinen, Lagerplätze, Arbeitsplätze, Fertigungsplätze (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016), Übergabe- und Parkplätze für Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sowie notwendige FTF-Fahrflächen innerhalb einer Produktionsumgebung darstellen können. Das Problem der Anordnung dieser OE ist als Facility Layout Problem (FLP) bekannt und zielt darauf ab, dass die Kosten des Materialtransportes der resultierenden Produktionsumgebung möglichst gering sind (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019).

Ein Problem bei den bisherigen Lösungsmethoden des FLP besteht darin, dass häufig Aspekte für den Einsatz eines realen FTS nicht berücksichtigt werden. Dazu gehören die Fahrflächen der Fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF), die Anbindung der Übergabepunkte an die FTF-Fahrfläche und die Betrachtung des Routings, Dispatching und Scheduling für die FTF (Vivaldini et al. 2015) auf Basis der generierten Produktionsumgebung.

1.1 Bezug zur Simulation

In diesem Beitrag wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches einerseits die Anforderungen eines FTS bei der Layouterstellung der Produktionsumgebung bzw. beim FLP berücksichtigt. Andererseits wird die Dynamik des FTS bereits bei der Layouterstellung durch eine abstrakte Simulation des FTF-Routings berücksichtigt. Dabei wird beispielsweise überprüft, ob das FTS in der Lage ist alle notwendigen Transportaufträge innerhalb eines bestimmten Zeitraums abzuarbeiten.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Im Folgenden werden die Grundlagen dargestellt. Dazu wird zunächst das FLP und anschließend das FTS sowie alle damit verbundenen Aspekte erläutert.

2.1 FLP

Das Facility Layout Problem (FLP) positioniert eine festgelegte Anzahl von OE innerhalb eines Standortträgers, sodass die Kosten des Materialtransportes minimiert werden (Scholz 2010, Klausnitzer 2019, Klausnitzer & Lasch 2016). Das FLP gehört zu den NP-harten, kombinatorischen Problemen (Klausnitzer & Lasch 2016) und wird bereits seit Jahrzehnten erforscht (Klausnitzer & Lasch 2016). Aufgrund dessen gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Lösungsverfahren mit verschiedenen Ansätzen. Viele dieser Ansätze berücksichtigen nur ausgewählte Aspekte, wie bspw. die Ermittlung der Übergabepunkte. Die Schritte eins bis einschließlich drei aus Abbildung 2 sind aus der Literatur bekannt. Scholz (2010) hat einen FLP-Ansatz zur Anordnung von OE basierend auf einer speziellen Datenstruktur – Slicing Trees (ST) – entwickelt. Diese bietet die Möglichkeit mit einem einfachen Verfahren eine Gangstruktur im Layout einzufügen (siehe Kap. 4). Friedrich et al. (2018) haben das FLP-Lösungsverfahren um die Ermittlung der Übergabepunkte erweitert. Dabei konnte ein Übergabepunkt innerhalb einer der vier Ecken einer OE positioniert werden. Dies ist für die spätere Anbindung an die Transportgänge — das Einfügen der Übergabeflächen — sinnvoll. Klausnitzer und Lasch (2016) haben Transportgänge abhängig von den Transportbeziehungen und -intensitäten zwischen den OE innerhalb der Produktionsumgebung für den Materialtransport eingefügt. Allerdings werden bei diesem Verfahren die Aspekte des FTF-Routings nicht berücksichtigt bspw. können Lösungen auftreten bei denen nicht jede OE von jeder anderen OE aus erreicht werden kann (Klausnitzer und Lasch 2016). Klausnitzer (2019) hat dieses Verfahren zum Einfügen von Transportgängen weiterentwickelt und fügt Gänge ein, wo die OE noch über keine Anbindung an Transportgänge verfügen.

2.1.1 Bewertung eines Layouts

Zur Bewertung eines Layouts werden die Materialtransportkosten C ermittelt (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019):

$$C = \sum_{i=1, j=1}^M (t_{ij} \cdot d_{ij})$$

Diese Summe definiert sich durch die Distanz d_{ij} von OE i nach OE j gewichtet mit der Transportintensität t_{ij} . Die Transportintensität ist der Transportmatrix zu entnehmen und entspricht den Materialieneinheiten, welche zwischen dem OE-Paar transportiert wird. M ist die Anzahl der zu platzierenden OE im Layout.

Die Distanz d_{ij} wird je nach FLP-Ansatz unterschiedlich berechnet. Der FLP-Ansätze von Scholz (2010), Castillo et al. (2005), Castillo & Westerlund (2005) und Wong et al. (2010) berechnen die Distanz zwischen den Schwerpunkten einer OE. Im Hinblick auf FTF ist diese Annahme des Fahrweges zwischen den Schwerpunkten realitätsfern. Bei dem Verfahren nach Friedrich et al. (2016) wird angenommen, dass die FTF entlang der Grenzen der OE fahren. Es werden Übergabepunkte ermittelt, welche am Rand der OE liegen & zwischen diesen wird entlang der Grenzen die Distanz ermittelt. Der physische Raum zum Befahren fehlt. In den Ansatz von Klausnitzer (2019) wird angenommen, dass sich die Fahrwege immer in der Mitte des Ganges befinden. Die pfadbasierte Distanz wird zwischen den Übergabepunkten und unter Berücksichtigung der Gänge berechnet.

2.2 FTS

FTS sind heute fast in allen Branchen und Produktionsbereichen zu finden und somit ein wichtiger Bestandteil der Intralogistik (Verein Deutscher Ingenieure). Nach der VDI 2510 werden FTS als innerbetriebliche, flurgebundene Systeme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen zur Abwicklung des Materialtransportes bezeichnet (Verein Deutscher Ingenieure). Zur Koordinierung der FTF benötigt das FTS das Wissen über mögliche Fahrwege der FTF. Eine Möglichkeit ist diese in Form von topologischen Graphen zu erstellen (Digani et al. 2014).

2.2.1 Topologische Graphen

Topologische Graphen sind planare Graphen mit einer endlichen Menge von Knoten und Kanten (Archdeacon 1996). Jede Kante verbindet zwei Knoten miteinander. Im Zusammenhang mit FTS repräsentieren die Kanten des topologischen Graphen Pfade bzw. Straßen für die FTF. Kreuzungen und wichtige Haltepunkte, bspw. Stationen zum Be- und Entladen an den OE, werden durch Graphknoten dargestellt.

Zur Erstellung des topologischen Graphen wird ein beim Fraunhofer IML weiterentwickeltes Verfahren, genannt Roadmap Graph Creator (RGC), auf Basis von Digani et al. (2014) verwendet. Im Rahmen der Forschung am Fraunhofer IML wurden weitere Parameter zur Erstellung des topologischen Graphen hinzugefügt. Beispielsweise ist es nun möglich auch innerhalb von Korridoren ein Raster aus Straßen erstellen zu lassen (Stenzel & Schmitz 2022). Der RGC kann aufgrund des Parameters FTF-Größe für alle möglichen FTF-Typen verwendet werden. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die Erstellung von redundanten Graphkanten. Ist ausreichend Platz vorhanden, können Pfade nebeneinandergelegt und miteinander verbunden werden und so mehrere FTF auf parallelen Fahrspuren gleichzeitig fahren.

Dies kann den Durchsatz des FTS erhöhen. Aufgrund der genannten Vorteile wird das RGC-Verfahren zur Erstellung von topologischen Graphen angewandt. Zum einen wird der topologische Graph verwendet, um die Distanz zwischen den Übergabepunkten zu berechnen (pfadbasierte Distanzmetrik) und zum anderen benötigt das Simulationsmodell zum Routing den topologischen Graphen zur Ermittlung der Pfade für die FTF zur Ausführung der Transportaufträge.

2.2.2 CCBS-Routing

Zur Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens der FTF in der erstellten Produktionsumgebung wird ein abstraktes Simulationsmodell erstellt. Dazu wird Continuous-time conflict-based search (CCBS) verwendet. CCBS ist ein Algorithmus zum Suchen von Pfaden für mehrere FTF in einer festgelegten Umgebung, sodass jedes FTF sein Ziel erreicht, ohne dabei Konflikte mit anderen FTF auszulösen (Andreychuk et al. 2021, Andreychuk et al. 2019).

Dabei wird eine Menge von Transportaufträgen festgelegt, indem Start und Ziel durch Knoten des topologischen Graphen definiert sind. Für jeden Transportauftrag wird genau ein FTF angenommen, welches im definierten Startknoten des topologischen Graphen startet. Die Pfade der FTF werden über den topologischen Graphen gewählt. Als Ergebnis gibt CCBS bestimmte Kennwerte für das Routing der übergebenen Menge von Transportaufträgen zurück, u.a. die Zeitspanne. Die Zeitspanne entspricht der Zeit, welche das letzte FTF benötigt, bis es sein Ziel erreicht hat. CCBS plant stapelweise, d.h. bevor nicht alle FTF ihr Ziel erreicht haben, können keine neuen Transportaufträge an FTF vergeben werden (Andreychuk et al. 2021, Andreychuk et al. 2019).

3 Anforderungen und Bewertungskriterien eines Layouts hinsichtlich der Anwendung in einem FTS

Bevor eine Lösung entwickelt werden kann, müssen die Anforderungen hinsichtlich des Layouts und des topologischen Graphen für den Einsatz innerhalb eines FTS festgelegt werden. Auf Basis dieser Kriterien wird das FLP-Lösungsverfahren weiterentwickelt, sodass ein auf die Anforderungen des FTF gut abgestimmtes Produktionsumgebungsmodell erzeugt werden kann. Dieses Modell kann zur Simulation verwendet und/oder in der Praxis bei Bedarf direkt umgesetzt werden.

3.1 Anforderungen an das Layout

Damit das auf Basis des FLP erstellte Layout sich für den Einsatz innerhalb eines FTS eignet, sollten Transportgänge für die FTF zwischen den einzelnen OE definiert sein (Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019). Ein weiterer Aspekt besteht in der Annahme, dass nur ein Übergabepunkt für jede OE definiert wird. Im Hinblick auf die Anwendung im FTS kann dies zu einem Problem führen. Zum Beispiel fahren mehrere FTF die gleiche OE an und kommen zum gleichen Zeitpunkt an, muss zunächst geklärt werden, welches FTF als erstes auf den Übergabepunkt zum Be- bzw. Entladen der Materialien fahren darf. Dies bedeutet für die anderen FTF zu warten. Dabei könnten die wartenden FTF andere FTF behindern, welche dabei sind andere Transportaufträge zu erfüllen. Dies führt zu Stau und Verzögerung im gesamten FFS. Deshalb kann es notwendig sein, wenn mehrere Übergabepunkte identifiziert werden

können. In unserem Ansatz verwenden wir dafür eine Übergabefläche (siehe später Kap. 4.4).

3.2 Anforderungen an den topologischen Graphen

Auf Basis der Gangstruktur soll der topologische Graph und damit die Wegpunkte für die FTF generiert werden. Der topologische Graph muss zwei Anforderungen für den Einsatz innerhalb eines FTS erfüllen. Zunächst muss sichergestellt sein, dass von jedem Graphknoten aus kann jeder andere Graphknoten über die Kanten erreicht werden kann. Diese Eigenschaft lässt sich über den Graphzusammenhang testen, beträgt dieser eins ist die Anforderung erfüllt (Diestel 2017). Weiterhin ist zu überprüfen, ob alle OE auch über Graphknoten und –kanten einen Anschluss an die Gangstruktur haben. Dazu wird geprüft, ob sich mindestens ein Graphknoten innerhalb der Übergabefläche befindet.

4 FLP-Solver

Aufgrund der uns bekannten FLP-Lösungsverfahren, welche die Anforderungen im Hinblick auf die Anwendung in einem FTS nicht berücksichtigen, haben wir einen eigenen Ansatz entwickelt. Dadurch sind die erstellten Produktionsumgebungen in der Praxis verwendbar. Schritte eins bis einschließlich drei (siehe Abb. 1) sind aus der Literatur bekannt. Unsere Weiterentwicklung des FLP-Lösungsverfahrens beinhaltet die weiteren Schritte vier bis einschließlich sechs aus Abbildung 1, welche Anforderungen hinsichtlich des FTS berücksichtigen. Dazu wird das FLP-Lösungsverfahren von Scholz (2010) erweitert. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte erläutert.

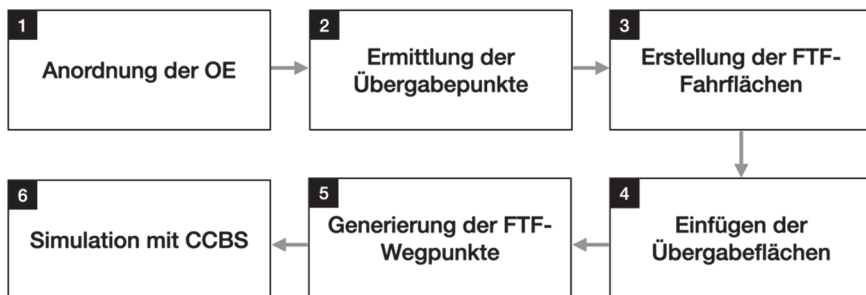


Abbildung 1: Darstellung der Schritte zur Generierung eines FLP-Layouts zur Erstellung einer Produktionsumgebung. Schritte eins bis einschließlich drei sind in der Literatur zu finden. Schritte vier bis einschließlich sechs sollen im Hinblick auf die Aspekte eines Materialtransportsystems ebenfalls bei der Erstellung berücksichtigt werden.

4.1 Anordnung der OE & Ermittlung der Übergabepunkte

Zur Lösung des FLP werden allgemein eine Reihe von Eingangsdaten benötigt (Scholz 2010). Dazu gehören die Abmessungen des Standortträgers, die Anzahl der zu platzierenden OE, die benötigte Fläche für jede OE, die Abmessungen jeder OE

und die Transportmatrix. Die Transportmatrix gibt an, wie viel Material zwischen den einzelnen OE transportiert werden muss (Scholz 2010). Auf Basis dieser benötigten Eingangsdaten werden zufällige STs generiert, um die endgültigen Positionen der OE und damit die Anordnung der OE zu erhalten (siehe Abb. 2a).

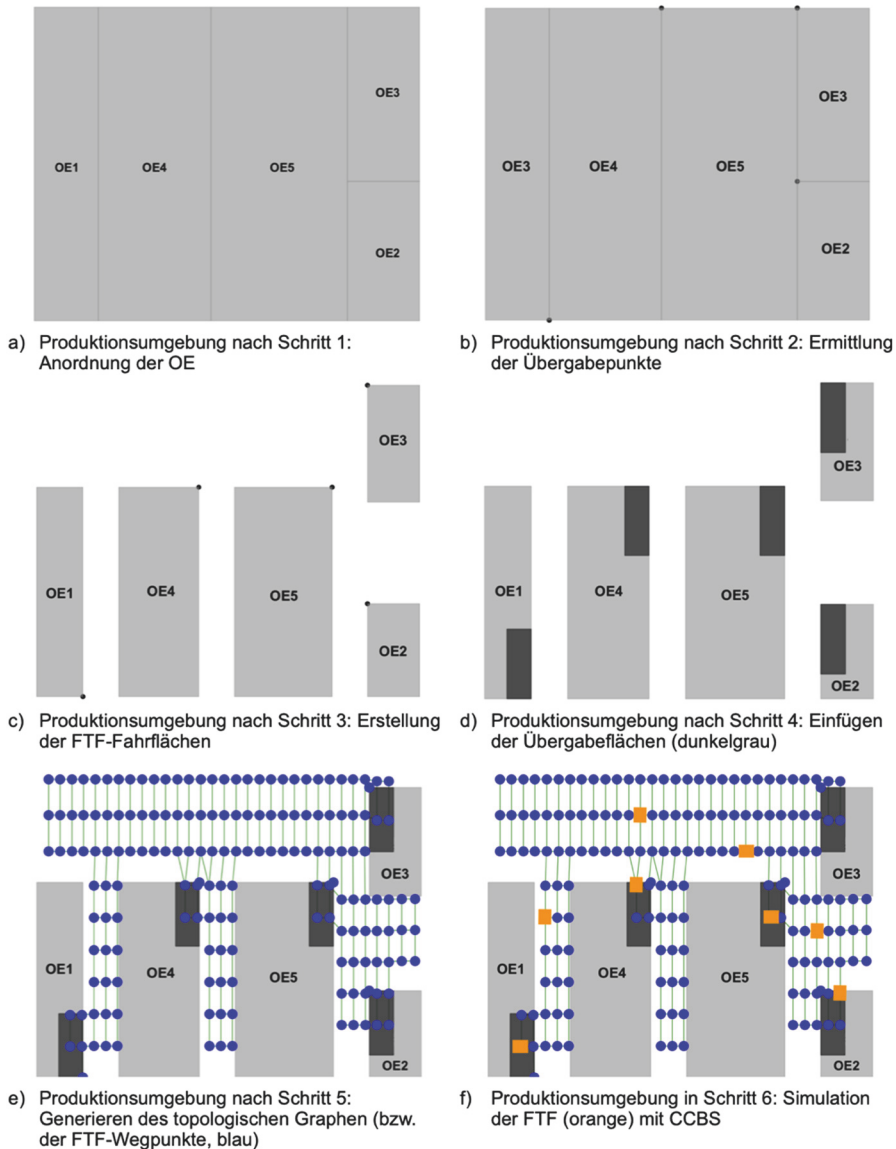


Abbildung 2: Darstellung der generierten Produktionsumgebung nach den Schritten aus Abbildung 1.

Zur Ermittlung der Übergabepunkte (= Station zum Be- und Entladen der FTF an den OE) wird das Verfahren von Friedrich et al. (2018) angewendet. Zunächst werden

Kandidaten für Übergabepunkte auf Basis der dominanten Region ermittelt. Zur Identifizierung der dominanten Region wird jede Ecke der OE als Graphknoten einem Graphen hinzugefügt. Die Grenzen der OE werden durch Kanten dargestellt. Die dominante Region besteht aus einer oder mehreren, aneinander liegende OE, welche mindestens für jede OE eine Ecke bzw. einen Graphknoten aufweisen. Diese Graphknoten in der dominanten Region stellen die Kandidaten für Übergabepunkte dar. Die Einschränkung von Friedrich et al. (2018), dass eine dominante Region rechteckig sein muss, haben wir aufgelöst. In unserem Ansatz kann die dominante Region auch ein Polygon sein. Nachdem die Kandidaten für Übergabepunkte ermittelt sind, werden die OE-Paare entsprechend ihrer Transportintensität absteigend sortiert. Für jedes OE-Paar werden die beiden Übergabepunkte ausgewählt (siehe Abb. 2b), welche die geringste Distanz zueinander aufweisen (Friedrich et al. 2018).

4.2 Erstellung der FTF-Fahrflächen

Zur Erstellung der Fahrflächen wird die Struktur der STs ausgenutzt. Die Idee stammt von Scholz (2010) und wurde für unsere Zwecke angepasst. Es wird jeder Schnittknoten im ST betrachtet. Das rechte Kind des Schnittknotens und alle Knoten davon werden, abhängig von der Schnittrichtung entlang der x- oder y-Achse in positiver Richtung um eine vordefinierte Gangbreite verschoben. Dadurch entstehen die Fahrflächen für die FTF (siehe Abb. 2c).

4.3 Einfügen der Übergabeflächen

Auf Basis der ermittelten Übergabepunkte aus Schritt 2 (siehe Abb. 1) werden Übergabeflächen mit einer vordefinierten Größe eingefügt. Alle Übergabeflächen sind gleich groß (siehe Abb. 2d). Die Idee ist diese Übergabeflächen ebenfalls als Fahrflächen für die FTF zu behandeln. Dadurch entstehen automatisch im Zusammenhang mit dem nächsten Schritt – Generierung der FTF-Wegpunkte – mehrere Übergabepunkte pro OE, da alle Graphknoten des topologischen Graphen innerhalb der Übergabefläche als Übergabepunkt identifiziert werden können.

4.4 Generierung der FTF-Wegpunkte

Die Generierung des topologischen Graphen erfolgt über die Freifläche, bestehend aus den Fahr- und Übergabeflächen anhand des RGC-Softwaretools (siehe Abb. 2e). Wichtig ist, dass der Graph die beiden genannten Anforderungen erfüllt, sonst kann das erstellte Layout nicht bewertet werden.

4.5 Simulation mit CCBS-Routing

Zur Bewertung des Layouts wird in unserem Ansatz die CCBS-Zeitspanne verwendet. Damit wird das dynamische Fahrverhalten der FTF und die Parallelität der abzuarbeitenden Transportaufträge im Layout berücksichtigt, welches bei anderen Bewertungskriterien für das FLP-Layout nicht berücksichtigt wird. Dazu muss zunächst eine Menge von Transportaufträgen generiert werden. Anschließend wird unter Berücksichtigung eines Zeitfensters CCBS mit den generierten Transportaufträgen ausgeführt und die Zeitspanne als Kosten für das Layout angenommen:

$$C = M(\pi)$$

Falls CCBS keine Lösung innerhalb des Zeitfensters findet, wird das doppelte der längsten Distanz im Layout zur Bewertung berechnet:

$$C = 2 \cdot \max(d_{ij})$$

5 Evaluierung

Zur Evaluierung haben wir mehrere Dateninstanzen (DI) aus verschiedenen Veröffentlichungen und deren Ergebnisse mit unserem Ansatz verglichen. Dazu haben wir je nach FLP-Ansatz unterschiedlich viele Schritte aus der Literatur zur Generierung eines Layouts (siehe Abb. 1) berücksichtigt. Die Auswertungen wurden auf einer AWS-Server Instanz EC2 C5A.XLarge (Amazon Web Services 2023) durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die vier verschiedenen Versionen.

Tabelle 2: Übersicht der Anwendungen zur Evaluierung.

Literatur	Distanz-Metrik	Berücksichtigte Schritte zur Generierung eines Layouts (Abb. 1)
Scholz (2010), Castillo et al. (2005), Castillo & Westerlund (2005), Wong et al. (2010)	Schwerpunkt-Distanz	1
Friedrich et al. (2016)	Konturbasierte Distanz	1 und 2
Klausnitzer (2019)	Pfadbasierte Distanz	1, 2 und 3
Unser Ansatz	Pfadbasierte Distanz über topo. Graphen	Alle Schritte aus Abbildung 1

Die vorgegebenen minimal und maximal Seitenlängen der einzelnen OE konnten aufgrund der ausgewählten Schnitte im ST nicht immer eingehalten werden. Aus diesem Grund werden die Begrenzungen für die Seitenlängen in der Evaluierung nicht berücksichtigt. Die Tabellen 2-5 vergleichen unsere Ergebnisse mit den besten Ergebnissen aus der Literatur sofern dies möglich ist. Der Zahlenwert in der Spalte „Bestes Ergebnis“ stellt die Materialtransportkosten C für die jeweilige DI dar. Der Wert „Anz. STs“ entspricht der Anzahl der gefundenen, gültigen STs für den gelisteten Durchlauf des FLP-Solvers.

5.1 FLP-Solver: reine Anordnung (V1)

Tabelle 2 zeigt, dass die Ergebnisse aus der Literatur für das FLP-Verfahren mit Schwerpunkt-Distanz mit Ausnahme der Dateninstanz AB20 durchschnittlich um 7,53% besser sind. Es ist wahrscheinlich, dass mit weiteren Ausführungen für Dateninstanz AB20 ein ähnliches oder besseres Ergebnis erzielt werden könnten.

Tabelle 2: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V1 mit Schwerpunkt-Distanz im Vergleich zu FLP-Ansätzen aus der Literatur.

DI	Bestes Ergebnis aus der Literatur	Unser Ansatz			Abweichung
		Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
OE7	131,57 (Castillo et al. 2005)	108,78	5	00:00:06	+17,32%
OE8	242,73 (Castillo & Westerlund 2005)	220,94	7	00:00:16	+8,98%
OE9	235,84 (Castillo et al. 2005)	207,51	9	00:00:25	+12,01%
VC10	19994,10 (Wong et al. 2010)	19183,98	6	00:02:58	+4,05%
BA12	8021 (Scholz 2010)	8071,28	34	00:02:21	-0,63%
BA14	4628,84 (Scholz 2010)	4469,25	19	00:04:27	+3,45%
AB20	5073,82 (Wong et al. 2010)	67725,68	1	00:10:46	-92,51%

Tabelle 3: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V2 mit konturbasierter Distanz im Vergleich zu den Ergebnissen von Friedrich et al. (2016).

DI	Ergebnis Friedrich et al. (2016)	Unser Ansatz			Abweichung
	Bestes Ergebnis	Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
OE7	21,64	36,85	7	00:00:12	-41,28%
OE8	52,09	66,64	6	00:00:25	-21,83%
OE9	53,29	76,32	7	00:00:32	-30,18%
VC10	3097,91	18134,46	6	00:04:46	-82,92%
BA12	3089,91	4747,06	27	00:08:25	-34,91%
BA14	2188,33	3318,85	21	00:15:19	-34,06%
AB20	1185,99	89280,45	2	04:02:16	-98,67%

5.2 FLP-Solver mit Übergabepunkten (V2)

Die Ergebnisse von Friedrich et al. (2016) konnten nicht erreicht werden (siehe Tab. 3). Ein Grund dafür ist die Einhaltung der Abmessungen des Layouts. Während Friedrich et al. (2016) Layouts mit größeren Abmessungen erlauben, lässt unser Ansatz nur Layouts zu, welche innerhalb der vorgegebenen Abmessungen liegen. Dies ist praxisnaher, da der notwendige Platz, bspw. eine Produktionshalle, begrenzt

ist. Die Halle im Nachgang zu vergrößern ist realitätsfern. Wie bereits zuvor besteht ebenfalls die Chance mit weiteren Ausführungen bessere Ergebnisse zu erzielen.

5.3 FLP-Solver mit Gangstruktur (V3)

Die Vergleichbarkeit zwischen Klausnitzer (2019) und unserem Ansatz ist aufgrund einiger Unterschiede, wie bspw. dem Verfahren zum Einfügen von Fahrwegen und der individuellen Parameter, welche das Ergebnis zusätzlich beeinflussen (Scholz 2010) schwierig. Im Vergleich mit den vier veröffentlichten Werten von Klausnitzer (2019) schneidet Dateninstanz BA14 am Besten ab. Auch hier besteht die Chance mit weiteren Ausführungen bessere Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 4: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V3 mit pfadbasierter Distanz auf Basis der Gänge im Layout verglichen mit den Ergebnissen von Klausnitzer (2019).

DI	Ergebnis Klausnitzer (2019)	Unser Ansatz			Abweichung
		Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
VC10	7116,14	27315,12	15	04:43:27	-73,95%
BA12	5561,12	8105,33	1	00:15:28	-31,39%
BA14	3784,47	3964,14	1	00:20:27	-4,53%
AB20	1529,63	89516,26	3	08:26:22	-98,29%

5.4 FLP-Solver mit Übergabeflächen & CCBS-Routing (V4)

Tabelle 5 stellt die Ergebnisse für unsere eigene Metrik dar, welche das CCBS-Routing und damit die Parallelität im FTS bzw. FFS berücksichtigt. Ebenso wie zuvor besteht die Chance auf bessere Ergebnisse mit weiteren Durchführungen, da mit jeder Ausführung zufällige Dateninstanz generiert werden auf dessen Basis optimiert wird (Scholz 2010).

Tabelle 5: Evaluierungsergebnisse für unseren Ansatz mit pfadbasierter Distanz auf Basis der topologischen Graphen und unter Berücksichtigung des CCBS-Routings.

DI	bestes Ergebnis unser Ansatz	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]
VC10	59,31	2	04:21:18
BA12	14,85	1	00:34:03
BA14	15,15	1	00:41:37
AB20	62,15	1	08:17:12

Auffällig ist, dass die Anzahl der gefundenen, gültigen Layouts (Anz. STs in den Tabellen) sich bei allen vier Versionen ebenfalls stark unterscheidet. Diese hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis, da dies zeigt, wie viele Layouts aus dem möglichen Lösungsraum betrachtet wurden. Weiterhin spielen die individuellen Parameter (z.B. Anzahl der zufällig generierten STs und Größe des betrachteten Suchraums) bei der

Suche nach dem lokal, besten Layout (Scholz 2010) eine Rolle. Diese wirken sich auf die Ergebnisse und auf die Laufzeit aus. Je länger die Laufzeit, desto mehr Layouts können betrachtet werden und desto größer die Wahrscheinlichkeit für ein gutes Ergebnis.

6 Abschlussbetrachtung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in dieser Veröffentlichung ein praxisnaher FLP-Ansatz zur Generierung von Layouts für Produktionsumgebungen unter Berücksichtigung der Anforderungen für den Einsatz in einem FTS entwickelt und vorgestellt wurde. Jedes resultierende Layout unseres Ansatzes kann in einem FTS verwendet werden.

Für zukünftige Forschungsarbeiten sollten zum einen eine Optimierung hinsichtlich der Laufzeit durchgeführt werden, sodass mehr Layouts in kürzerer Zeit berechnet werden können. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit für ein gutes Ergebnis. Darüber hinaus sollten einige Aspekte weiter optimiert werden, wie zum Beispiel die Frage, ob statt gleich große Übergabeflächen eher Übergabeflächen angepasst an die Transportintensitäten der OE gewählt werden sollten. So könnten OEs mit hohen Transportintensitäten von mehr FTF gleichzeitig angefahren werden. Auch das Verfahren zur Ermittlung der Übergabepunkte und damit die Positionierung der Übergabeflächen kann angepasst werden, da es nach dem Verfahren von Friedrich et al. (2016) möglich ist auch an den äußeren Rändern entlangzufahren (=Grenzen der OE). In der Realität nach Einfügen der Gangstruktur ist dies jedoch zum größten Teil nicht möglich, da dafür zusätzlicher Platz benötigt werden würde. Außerdem kann das Routing selbst ausgetauscht werden, indem beispielsweise ein praxisrelevanteres Anytime-Routing Verfahren verwendet wird. Im Gegensatz zur stapelweisen Planung bei CCBS (Andreychuk et al. 2022, Andreychuk et al. 2021) kann ein Fahrzeug beim Anytime-Routing, bspw. CARP (Mors et al. 2007), direkt einen neuen Transportauftrag erhalten, sobald der vorherige abgeschlossen ist, ohne auf das Abschließen von Transportaufträgen der anderen Fahrzeuge warten zu müssen.

Literatur

- Amazon Web Services, Inc. bzw. Tochtergesellschaften des Unternehmens: Amazon EC2 C5-Instances (2023). url: <https://aws.amazon.com/de/ec2/instance-types/c5/>
- Andreychuk, A.; Yakovlev, K.; Surynek, P.; Atzmon, D.; Stern, R.: Multi-agent pathfinding with continuous time. *Artificial Intelligence*, 305 (2022). S. 103662.
- Andreychuk, A.; Yakovlev, K.; Boyarski, E.; & Stern, R.: Improving continuous-time conflict based search. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence Vol. 35* (2021). S. 11220-11227.
- Arifin, R.; Egbelu, P.J.: Determination of vehicle requirements in automated guided vehicle systems: A statistical approach. In: *Production Planning & Control* 11.3 (2000), S. 258–270.
- Archdeacon, D. Topological graph theory. In: *A survey. Congressus Numerantium* 115.5-54 (1996), S. 18.

- Castillo, I.; Westerlund, J.; Emet, S.; Westerlund, T.: Optimization of block layout design problems with unequal areas: A comparison of MILP and MINLP optimization methods. In: *Computers & Chemical Engineering* 30.1 (2005), S. 54-69.
- Castillo, I.; Westerlund, T.: An ε -accurate model for optimal unequal-area block layout design. In: *Computers & Operations Research*. 32 (2005). S. 429-447.
- Diestel, R.: *Graphentheorie*. Bd. 5. Springer Spektrum, 2017. ISBN: 978-3-662-53633-9. url: <https://www.springer.com/de/book/9783662536339>.
- Digani, V.; Sabbatini, L.; Secchi, C.; Fantuzzi, C.: An automatic approach for the generation of the roadmap for multi-AGV systems in an industrial environment. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2014). 1736-1741. 10.1109/IROS.2014.6942789.
- Friedrich, C.; Klausnitzer, A.; Lasch, R.: Integrated slicing tree approach for solving the facility layout problem with input and output locations based on contour distance. In: *European Journal of Operational Research*, 270(3) (2018). S. 837-851.
- Hehenberger, P.: *Computergestützte Fertigung. Eine kompakte Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.
- Klausnitzer, A.: A Scatter Search Approach for the Facility Layout Problem with Aisle Design. In: Fortz, B.; Labbé, M. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2018*. S. 435-441.
- Klausnitzer, A.; Lasch, R.: Extended Model Formulation of the Facility Layout Problem with Aisle Structure. In: Mattfeld, D.; Spengler, T.; Brinkmann, J.; Grunewald, M. (Hrsg.): *Logistics Management. Lecture Notes in Logistics*. Springer, Cham 2016. S. 89-101.
- Mors, A. ter.; Zutt, J., Witteveen, C.: Context-Aware Logistic Routing and Scheduling. In: *ICAPS* (2007), S. 328 – 335.
- Rajotia, S.; Shanker K.; Batra, J.L.: Determination of optimal AGV fleet size for an FMS. In: *International Journal of Production Research* 36.5 (1998), S. 1177-1198.
- Scholz, D.: *Innerbetriebliche Standortplanung. Das Konzept der Slicing Trees bei der Optimierung von Layoutstrukturen*. Wiesbaden: Gabler Verlag 2010.
- Stenzel, J.; Schmitz, L.: Automated Roadmap Graph Creation and MAPF Benchmarking for Large AGV Fleets, *2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, Prague, Czech Republic, 2022, pp. 146-153, doi: 10.1109/ICARA55094.2022.9738574.
- Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2510, Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth 2005.
- Vivaldini, K. C.; Rocha, L. F.; Becker, M.; Moreira, A. P: Comprehensive review of the dispatching, scheduling and routing of AGVs. In *CONTROLO'2014 – proceedings of the 11th Portuguese conference on automatic control* (2015). S. 505-514. Springer International Publishing.
- Wong, K.; Komarudin, K.: Solving facility layout problems using Flexible Bay Structure representation and Ant System algorithm. In: *Expert Syst. Appl.*. 37 (2010) S. 5523-5527.

*Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

Praxisbeispiele zur simulationsbasierten Belastungsplanung und -steuerung des Personaleinsatzes in der Montage

Practical Examples of Simulation-based Load Planning and Control of Personnel Deployment in the Assembly Department

Lothar März, STREMLER AG, 88181 Lindau (Bodensee), Germany
lothar.maerz@strempler.de

Abstract: The shortage of skilled workers and the increasing aging of European society make it necessary to deploy qualified but performance-impaired employees in assembly in such a way that the load is tolerable and does not lead to absences. To be able to determine the load on an assembly employee, it is necessary not only to consider the aspects for determining the physical and psychological effects of activities on the individual, but also to record the load profile as accurately as possible. Practical examples are used to show how load-oriented personnel deployment can be supported by simulation during planning and control during operation.

1 Personaleinsatz in der Montage und demographischer Wandel

In der Montage entstehen die meisten Produktvarianten durch die Kombination von Modulen und Komponenten. Mit der hohen Produktvarianz geht eine hohe Prozessvarianz einher. Die hohe Variabilität des Produktionsprogramms erfordert eine hohe Arbeitsflexibilität, die nur durch den Einsatz von Mitarbeiter möglich wird. Aufgrund der hohen Arbeitskosten in Deutschland und den westeuropäischen Ländern kommt der Planung eine entsprechend große Bedeutung zu (Boysen et al. 2007). Eine optimierte Auslastung bei wechselndem Produktionsmix macht die Unternehmen auch gegenüber Konkurrenten aus dem Osten konkurrenzfähig.

Einen weiteren Trend im produktionstechnischen Umfeld stellt der demografische Wandel dar. Sinkende Geburtenzahlen und ein steigender Altersdurchschnitt der gegenwärtigen Belegschaft führen zu deutlichen Veränderungen in der Altersstruktur (EU Commission 2020). Studien des statistischen Bundesamtes besagen, dass die Zahl der Menschen im Rentenalter ab 67 Jahren in den 2020er und 2030er Jahren massiv steigen wird (Statistisches Bundesamt 2022). Hinzu kommt, dass die alternde

Belegschaft in ihrer Einsatzfähigkeit zunehmend durch „Beeinträchtigungen aus Krankheit, Unfällen, kumulierten Belastungen oder einfach ungesunden Lebensgewohnheiten“ (Prasch 2010) eingeschränkt ist (Abbildung 1).

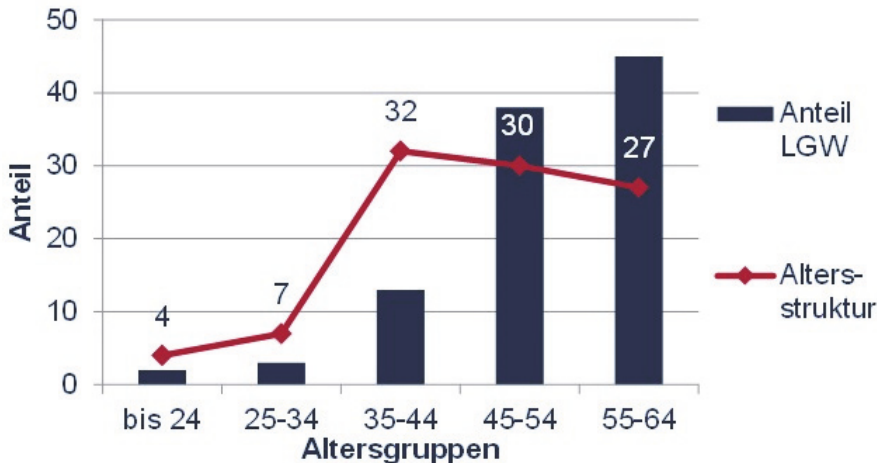


Abbildung 1: Altersstruktur und Anteil Leistungsgewandelter (Reinhart und Egbers 2012)

Dieser Anteil der Arbeiterschaft wird den sogenannten leistungsgewandelten Mitarbeitern (LGW) zugeordnet. Zudem wird sich im Zuge des demografischen Wandels nicht nur das Durchschnittsalter erhöhen, sondern ebenfalls ein Mangel an Fachkräften einstellen (Barstedde und Schüler 2020). Die Zahl der Menschen im Erwerbsalter wird in den kommenden 15 Jahren um 1,6 bis 4,8 Millionen Menschen sinken (Statistisches Bundesamt 2022).

Der Beitrag zeigt anhand exemplarischer Anwendungsbeispiele auf, welche Ansätze es ermöglichen, leistungsgewandelte Mitarbeiter in die Montagelinie zu integrieren, um deren Wissen und Kompetenzen in der Montagelinie zu halten. Die Herausforderung liegt darin, Tätigkeiten bzw. Belastungsprofile über der Zeit zu identifizieren, die trotz Leistungswandlung erfüllt werden können und Arbeitsplätze so zu gestalten, dass sie notwendige Bedingungen aufweisen (Abele und Reinhart 2011). Die Simulation unterstützt dabei, Überbelastungen im Vorfeld der Montage zu erkennen, während die Simulation in Kombination mit digitalen Unterstützungssystemen im laufenden Betrieb Belastungsspitzen vermeiden hilft.

Die Betrachtung solcher sozialen Aspekte, die die Auswirkungen der Planung einer Produktion auf die Gesundheit, dem Einsatz, der Zufriedenheit und der Entwicklung der Mitarbeiter berücksichtigt, gewinnt zunehmend an Bedeutung und ist Gegenstand weitergehender Untersuchungen (Trost et al. 2022)

Eine wesentliche Komponente bei der Beurteilung der Belastung der Mitarbeiter ist die Erfassung der physischen und psychischen Belastung über der Zeit. Hierbei kann die Simulation der Arbeitsabläufe einen entscheidenden Beitrag leisten, da sie die einzige Methode ist, die den Zusammenhang zwischen Produktionssequenz,

Mitarbeiterzuordnung und den dynamischen Wirkzusammenhängen präzise im Vorfeld der Umsetzung ermitteln kann.

Zur Austaktung von Fließbandproduktionen gibt es eine Vielzahl an Verfahren, die eine gleichmäßigere und insgesamt höhere Auslastung des eingesetzten Personals versprechen (Becker und Scholl 2006, Naveen und Dalgobind 2013). Die meisten Anwendungen setzen allerdings auf einen periodenbezogenen Ver- und Ausgleich von Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf je Zyklus. Die Bewertung von Unter- und Überlastfällen erfolgt über den Summenvergleich von Prozesszeitsummen und Personalverfügbarkeit. Dieser Ansatz ist allerdings nicht hinreichend, um die individuellen Belastungsanforderungen je Prozessschritt und Mitarbeiter ermitteln zu können. Dazu muss die zeitliche Zuordnung eines jeden Prozesses zu Mitarbeitern unter Berücksichtigung der zeitlichen, ressourcenbezogenen und wechselseitigen Abhängigkeiten ermittelt werden. Der Einfluss der dynamischen Wirkzusammenhänge je Prozessschritt kann durch die ereignis-diskrete Simulation aufgezeigt werden (März et al. 2012). Im Zusammenhang mit Verfahren zur Bewertung der physischen und psychischen Auswirkungen durch körperliche und mentale (Zeitdruck) Belastungen eignet sich die simulationsbasierte Personaleinsatzplanung daher ideal als Grundlage zur Bewertung und Vergleich von Belastungsprofilen.

2 Simulationsgestützte Planung zur Belastungssteuerung

2.1 Anwendungsbeispiel 1: Planung leistungsgewandelter Mitarbeiter

Im ersten Praxisbeispiel wird aufgezeigt, wie durch die Auswahl und Abstimmung von Montagestationen, dem Workflow von Mitarbeitern und der Auslegung von Puffer vor den Montagestationen eine optimale Konfiguration erreicht werden kann, die eine hohe Ausbringung verspricht. Die Berücksichtigung von leistungsgewandelten Mitarbeitern spielte in diesem Anwendungsszenario eine besondere Rolle, um den Einsatz dieser Mitarbeiter als Springer, mit höherer Qualifikation als die der Linienmitarbeiter, einbinden zu können. Der Begriff leistungsgewandelte Mitarbeiter „charakterisiert Personen, die aufgrund körperlicher, geistiger oder psychischer Beeinträchtigungen nicht in der Lage sind, allgemeine Arbeitsanforderungen in vollem Umfang gerecht zu werden“ (Zäh et al. 2005). Mit der vorgestellten Methodik kann in der Planung der Einsatz erfahrener, aber leistungsgewandelter Mitarbeiter berücksichtigt werden (Prasch 2010, Dollinger und Reinhart 2016). Die Simulation der Abläufe unterstützt bei der Ermittlung der Belastung, die die Mitarbeiter erfahren (Dollinger 2021).

Grundlage der Planung ist eine Simulationsanwendung, mit dessen Hilfe alternative Konfigurationen (z. B. Variation des Stammpersonals) analysiert, bewertet und Springerbedarfe quantifiziert werden können. In einem ersten Schritt wurde dazu die reale Montagelinie in einem Simulationsmodell abgebildet. Nach Validation der Simulation durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Realverhalten der Linie konnten in der weiteren Folge die Auswirkungen geänderter Konfigurationen abgebildet und bewertet werden. Konkret ging es um die Fragestellung, wie sich der Einsatz eines leistungsgewandelten Mitarbeiters als Springer zwischen mehreren

Arbeitsstationen unter Berücksichtigung der dynamischen Abläufe auswirkt. In Abbildung 2 ist der letztgültige Modellierungszustand dargestellt, bei dem der Einsatz des leistungsgewandelten Springers mit aufgenommen ist.

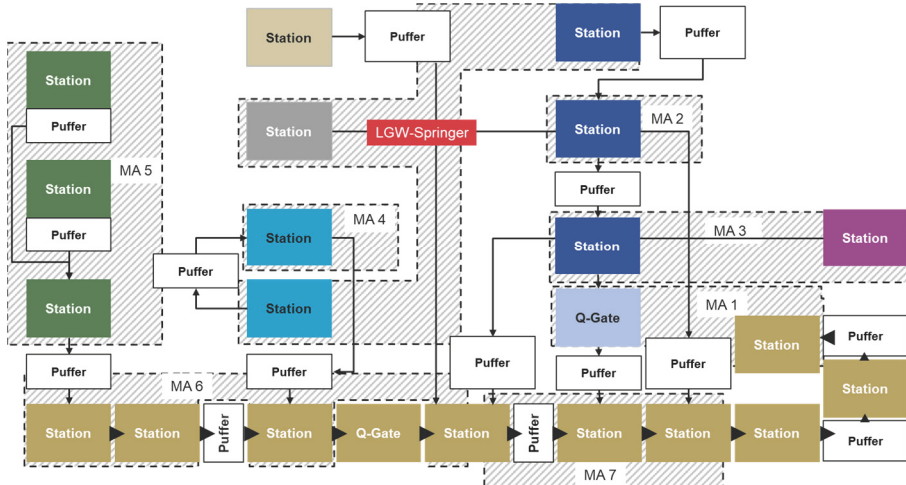


Abbildung 2: Linienstruktur und Einsatz der LGW-Springer

Durch Variation der Einstellparameter und der Berücksichtigung der Wirkzusammenhänge der Montage konnten im Simulationsmodell das dynamische Verhalten vorausgesagt werden. Die Ergebnisse der Simulation können in Form von Ganttcharts analysiert und bewertet werden. Das Modell dient zur Abbildung von alternativen Szenarien und zur Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter als Springer. Durch Rekonfiguration der Arbeitsablauffolgen und alternativer Zuordnung der Prozesse zu Arbeitsstationen konnte die Produktivität der Linie bei gleichzeitiger Erhöhung des Einsatzes der leistungsgewandelten Mitarbeiter gesteigert werden. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse aufgeführt. Die Auswertung zeigt auf, dass die Auslastung der Mitarbeiter um 1,6% erhöht wurde und die Auslastung (Zeitanteil) des leistungsgewandelten Mitarbeiters um knapp 20% erhöht wurde.

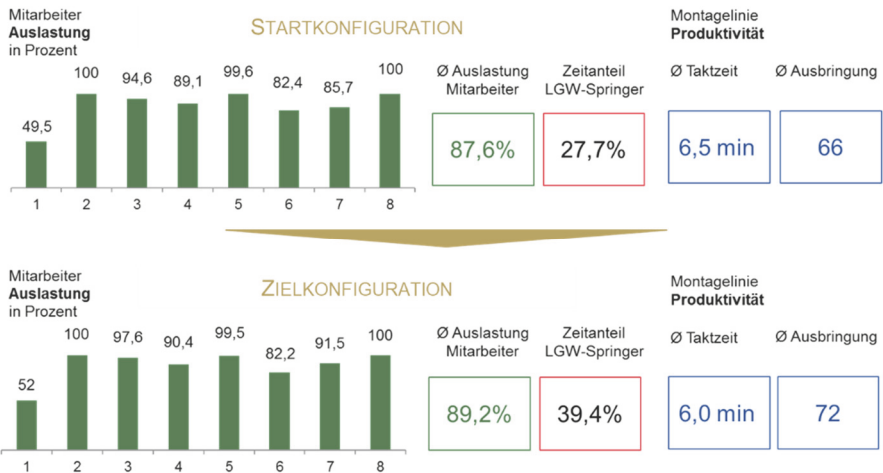


Abbildung 3: Ergebnisse der Optimierung des LGW-Mitarbeiterereinsatzes

In diesem Beispiel stand vor allem die Leistungswandlung älterer Mitarbeiter im Vordergrund, welche sich aus dem natürlichen Alterungsprozess ergibt. Das Potential von Leistungsgewandelten wird in ihrer Erfahrung und hohen Kompetenz gesehen. Somit entsprechen sie den vorherig erläuterten Charakteristika von Springern in der Rolle des Wissensvermittlers.

Der hier vorgestellte Ansatz verfolgte daher das Ziel, eine Methode zu entwickeln, welche es ermöglicht, Leistungsgewandelte als Springer einzusetzen und sie nicht in andere Unternehmensbereiche, in denen sie weniger belastet werden, umzusiedeln. Dadurch, dass Springer nicht Vollzeit im Takt arbeiten, ist ihr Tätigkeitsspektrum belastungsärmer und kann auch von nicht voll leistungsfähigen Mitarbeitern erledigt werden. Damit die Personaleinsatzplanung eine optimale Zusammensetzung aus Leistungsgewandelten und nicht Leistungsgewandelten bestimmen kann, wurde im vorgestellten Fall die Simulation zur Bedarfsprognostizierung sowie Einsatzsteuerung genutzt.

2.2 Anwendungsbeispiel 2: Belastungssteuerung durch Job Rotation

Eine andere Möglichkeit, eine Überbelastung von Mitarbeitern zu vermeiden, ist es, die physische und psychische Belastung während der Montagetätigkeiten transparent zu machen und die Auswirkungen von geplanten Montagetätigkeiten auf die Belastung der Mitarbeiter zu analysieren (Tropschuh et al. 2021). Denn langfristige psychische und physische Überlastung führen zu zunehmenden Fehlzeiten und chronischer Erkrankung der Mitarbeiter (Langhoff und Schmelzer 2015, Storm 2020).

Das Simulationsmodell dient hierbei zur Ermittlung der mitarbeiterindividuellen Belastungsprofile, die in der weiteren Folge mit Methoden zur Ermittlung der physischen und psychischen Belastung verknüpft werden. Die Belastungsprofile aus der Simulation ergeben sich aus dem Belastungskennblatt einer jeden einzelnen Tätigkeit. Mit der Zuordnung von Mitarbeiter zu Stationen bzw. Montageprozessen lassen sich somit die Belastungskurven über der Zeit aufstellen.

Durch die Abbildung verschiedener Szenarien im Simulationsmodell, bei denen die Mitarbeiter durch Job Rotation andere Aufgaben zugeteilt werden, können die Belastungsverläufe hinsichtlich Überlast bewertet und verglichen werden.

Im konkreten Beispiel liegt eine Simulationsanwendung vor, mit dessen Hilfe beanspruchungs- und kompetenzorientierte Rotationspläne, Schichtzusammensetzungen sowie gemittelte Beanspruchungswerte erstellt werden können. Ziel der Simulation ist es, die Prozesszeitanforderungen der anliegenden Sequenzen sowie die Auslastungen der Mitarbeiter an der Linie mit hoher Genauigkeit abzubilden und verschiedene Szenarien der Mitarbeiterrotation zu simulieren. Das zugrundeliegende Konzept zur Ermittlung der Belastungsprofile inklusive der Zuordnungssystematik des Simulationsmodelles ist in Abbildung 4 dargestellt.

Auf Prozessseite wird hier von der Arbeitsstation ausgegangen, welche Qualifikationsanforderungen an die Mitarbeitenden stellt. Die Arbeitsstation wird durch die vorherrschende physische und psychische Belastung definiert, welche durch Arbeitsplatzbewertungen, Gefährdungsbeurteilungen und Analysen der Arbeitsfehler und Krankschreibungen erfolgt. Die Station dient dabei als Zuordnungsschlüssel zwischen den einzelnen Klassen. Die Klasse Station ist wiederum eingebettet in Prozesse und Sequenzen. Bei einer Sequenz wird die Reihenfolge der zu montierenden Produkte festgelegt, wodurch Lastspitzen auftreten können. Die Simulation ermittelt die Auslastung der Mitarbeitenden anhand der zeitlichen Dauer der Tätigkeiten bei verschiedenen Produktvarianten einer Sequenz. Die Auslastung ergibt sich aus den Prozesszeitanforderungen. Die Kategorie Mitarbeiter definiert sich über das Qualifikationsprofil, die Beanspruchungen und Leistungsgruppe. Die Leistungsgruppen beziehen sich auf Leistungsvoraussetzungen und die Rückmeldungen der Mitarbeitenden im Betrieb.

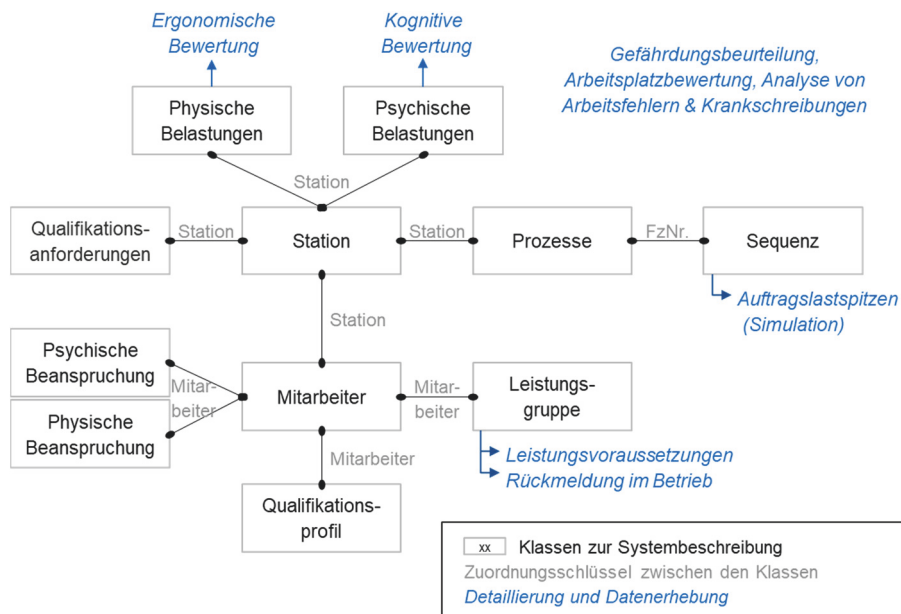


Abbildung 4: Konzeptschaubild und Zuordnungssystematik des Simulationsmodells

Im Rahmen der Simulation wird einerseits die Produktionsumgebung mit den einzelnen Arbeitsplätzen, variantenspezifischen Prozesszeiten und Auslastungen abgebildet. Diese Produktionssimulation ist in Abbildung 5 dargestellt. Die blauen Balken repräsentieren die Prozesszeitanforderungen je Takt bzw. Auftrag in Relation zur verfügbaren Kapazität der ausgewählten Station. Die grünen Balken zeigen für jeden Mitarbeiter die Auslastung in Prozent seiner Kapazität je Takt an. Die roten Balkenbereiche stellen sogenannte Überlastzeiten dar, bei denen die variantenspezifische Prozesszeit die Taktzeit überschreitet. Diese Überlastzeiten sind Indikatoren für Überbeanspruchung durch Zeitdruck und können für normalgeschulte Mitarbeitende bereits zu psychischer Überbeanspruchung führen.

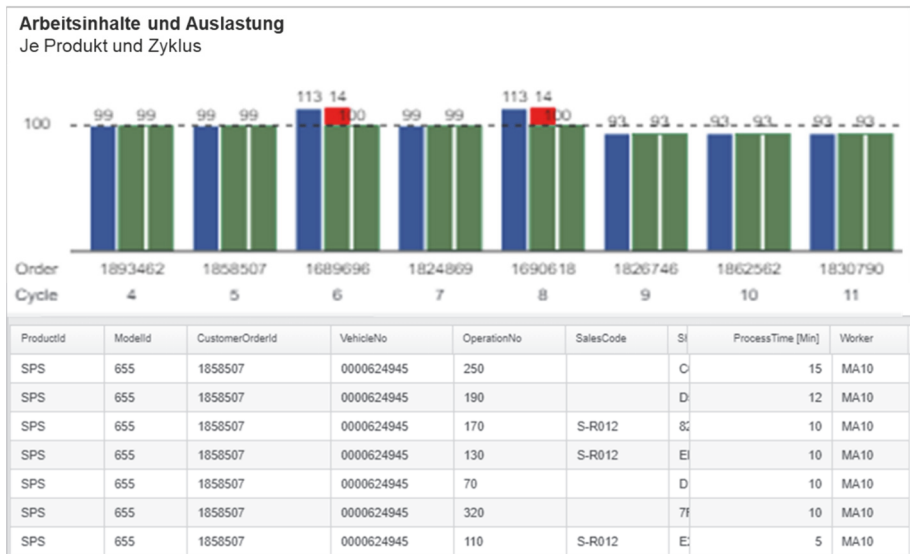


Abbildung 5: Produktionssimulation mit Abbildung der Überlastzeiten

Die in der Abbildung dargestellte Auslastung der Mitarbeitenden kann zudem noch personenindividuell angepasst werden. Mitarbeitende mit einer höheren Montagekompetenz erledigen die Arbeitsaufgaben routinierter und schneller als neue Mitarbeitende. Daher wird die jeweilige Kompetenz in die individuelle Auslastung mit integriert. Die Simulation der Mensch-Faktoren beinhaltet zudem noch die Prädiktion der physischen und psychischen Beanspruchung. Hierdurch kann mit Hilfe der Simulation die geschätzte Beanspruchung visualisiert und mögliche Überbeanspruchungen vor der Anwendung der Einsatzplanung identifiziert werden.

3 Belastungsorientierte Steuerung mit Smart Devices

Häufige Ursache von Belastungsspitzen zu Beginn und im laufenden Betrieb der Montage sind ein abweichender Personalantritt, kurzfristige Störungen oder Taktzeit- bzw. Prozesszeitabweichungen. Dadurch verändern sich die Zeitpunkte der vorab geplanten Personaleinsätze, was wiederum zu temporären Belastungsspitzen führen kann.

Durch die Steuerung der Springer durch Smart Devices können neue Modelle der Arbeitsorganisation geschaffen werden, die den Einsatz von leistungsgewandelten Mitarbeitern erleichtern (Lotter und Wiendahl 2013, Reinhart et al. 2016) bzw. Belastungsspitzen bei den Montagetätigkeiten vermeiden helfen. Zum Ausgleich zunehmender Kapazitätsengpässe und Taktzeitüberschreitungen aufgrund eines variantenreichen Produktionsprogramms mit unterschiedlichen Montageumfängen werden zukünftig zunehmend Springer als Unterstützer eingesetzt. Der Einsatz als Springer ist prädestiniert für leistungsgewandelte Mitarbeiter, wie bereits in Kapitel 2.1 aufgezeigt.

Die Koordination der Zuweisung von wechselnden Arbeitsstationen und -inhalten kann durch den Einsatz von Smart Devices unterstützt werden. Smart Devices sind nach neueren Definitionen elektronische Geräte, die kabellos, mobil, vernetzt und mit verschiedenen Sensoren (bspw. Geosensoren, Gyroskopen, Temperatur aber auch Kameras) ausgerüstet sind. Hierunter fallen z.B. Smartphones, Tablet PCs und Datenbrillen (google-glass) und Smart Watches (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Beispiele für Smart Devices

Durch zeitnahe Rückmeldung des aktuellen Produktionsstatus und einer dialogfähigen Simulation mit kurzen Laufzeiten in Sekunden können die Prozesse über digitale Medien wie Smart Watches, Mobilfunktelefone oder Tablets situations- und belastungsgerecht an die Mitarbeiter übermittelt werden (Voith Group 2023). In Abbildung 7 ist modellhaft aufgezeigt, wie das Zusammenspiel zwischen simulationsgestützter Planung und der Rückmeldung über Smart Devices während der operativen Montage erfolgen kann. Dabei werden die Belastungsgrenzen während der Planung bereits berücksichtigt und kontinuierlich mit den Rückmeldungen aus der Produktion abgeglichen.

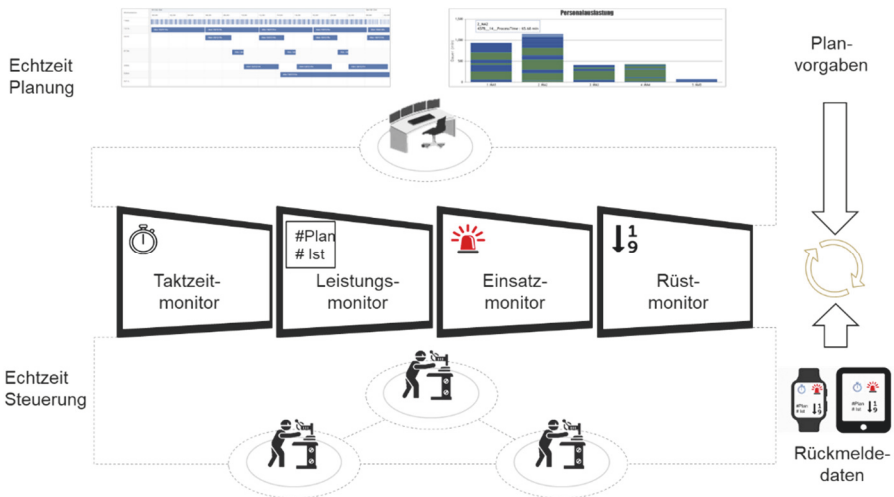


Abbildung 7: Synchronisation von Planung und Steuerung zur Belastungssteuerung

Das Ziel ist ein kompetenzbasierter Ansatz, der zum einen die Effizienz von Springereinsätzen erhöht und zum anderen eine neue Rolle des Springers - als Wissensvermittler - aufnimmt. Durch die Nutzung von Smart Interfaces als Steuerungsmedium wird eine schnelle Kommunikation sowie ein Datentracking ermöglicht. Die aufgezeichneten Daten können auf Basis von Erfahrungswerten zur prospektiven Planung einer effizienteren Zusammensetzung von Springerpools genutzt werden.

Das Forschungsvorhaben „Smart-Interface gesteuerte Springerunterstützung durch leistungsgewandelte Mitarbeiter in der Montage“ der Bayerischen Forschungsstiftung (Bayerische Forschungsstiftung 2023) beschäftigte sich mit der Entwicklung und Evaluation eines Ansatzes zur Smart-Interface-gesteuerten Springerunterstützung in der Montage. Dabei wurde insbesondere der Einsatz leistungsgewandelter Mitarbeiter in einer praxisorientierten Industrieanwendung als Unterstützer in der Linie untersucht, in der diese einerseits ihr Erfahrungswissen an unerfahrene Mitarbeiter weitergeben können und andererseits hinsichtlich ihrer auszuführenden Tätigkeiten einen Belastungswechsel erfahren.

Die Smart Devices können auch bei der Erhebung der individuellen Beanspruchungszustände der Mitarbeitenden und als Kommunikationsschnittstelle zwischen Mitarbeitenden, Teamleitenden und Planenden dienen. Durch die Rückmeldung individueller Beanspruchungswerte kann beispielsweise eine Rotationslogik an die einzelnen Mitarbeitenden angepasst und somit zum langfristigen Leistungserhalt beitragen.

4 Fazit

Der demographische Wandel und der Fachkräftemangel zwingt die Unternehmen dazu, neue Arbeitszeitmodelle in der Montage zu entwickeln, um einerseits das Wissen erfahrener Mitarbeiter im Unternehmen zu erhalten und andererseits die individuellen physischen und psychischen Belastungsgrenzen bei zunehmender

Varianz der operativen Anforderungen zu berücksichtigen. Durch die präzise Abbildung der zeitlichen Abläufe in einer Simulation kann die Transparenz geschaffen werden, um

- den Einsatz von Mitarbeitern planen zu können, die mit verminderter Leistung Tätigkeiten mit höherer Qualifikation vornehmen,
- die zeitlichen Belastungsprofile eines jeden Mitarbeiters in Kombination mit ergonomischen und kognitiven Belastungen zu erstellen und
- in Verbindung mit Smart Devices im operativen Betrieb eine stressfreie und belastungsorientierte Steuerung der Mitarbeiter vornehmen zu können.

Anhand der Beispiele wurde aufgezeigt, welche Chancen und Potenziale in der simulationsgestützten Belastungsplanung und -steuerung des Personaleinsatzes in der Montage stecken.

Danksagung

Die aufgezeigten Beispiele zur simulationsgestützten Belastungsplanung und -steuerung sind u.a. im Rahmen der Forschungsprojekte „Smart Interfaces“ und „Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Mitarbeitereinsatzplanung“ der Bayerischen Forschungsstiftung entstanden, wofür sich der Autor bedankt.

Literatur

- Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011.
- Bayerische Forschungsstiftung 2023: Smart Interfaces - Smart Interface-gesteuerte Springerunterstützung durch leistungsgewandelte Mitarbeiter in der Montage. <https://www.forschungsstiftung.de/index.php/Projekte/Details/Smart-Interface-gesteuerte-Springerunterstuetzung-durch-leistungsgewandelte-Mitarbeiter-in-der-Montage.html>, letzter Zugriff am 11.07.2023
- Becker C.; Scholl, A.: A survey on problem and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research* 168. 2006, S.694-715.
- Boysen, N.; Flidner, M.; Scholl, A.: A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*. Volume 183, Issue 2, 1 Dezember 2007, S. 674-693.
- Burstedde, A.; Schüler R.: Reagieren Löhne in Deutschland auf den Fachkräftemangel? *IW-Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung*. ISSN: 1864-810X, Volume 47 4, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln 2020, S. 45-66.
- Dollinger, Ch.; Reinhart, G.: A competence-based approach to support the working force within assembly lines. *Advances in ergonomics of manufacturing: Managing the enterprise of the future* 2016, S. 557-567.
- Dollinger, C.: Methode zur kosteneffizienten Konfiguration eines Springerpools in der taktgebundenen Montage. Dissertation TU München, 2021.
- EU Commission, 2020: European Commission adopted Report on the Impact of Demographic Change in Europe. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1056, letzter Zugriff 22.02.2023.

- Langhoff, T.; Schmelzer, K.-M.: Der Zusammenhang zwischen psychischen Belastungen in der Arbeitswelt und psychischen Erkrankungen, in Exploring demographics. Wiesbaden, Springer Fachmedien 2015, S. 529.
- Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Springer 2013
- März, L.; Pröpster, M.; Röser, S.: Simulationsgestützte Bewertung getakteter Linien. Varianten beherrschen durch dynamische Berücksichtigung der Mitarbeiterflexibilität. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 3, S. 145–151.
- Naveen, K.; Dalgobind, M.: Assembly line balancing: A review of developments and trends in approach to industrial application. In: Global journal of researches in engineering industrial engineering. Volume 13 Issue 2 Version 1.0 Year 2013. Global Journals Inc. (USA).
- Prasch, M.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Forschungsberichte / IWB, Bd. 243. München: Utz 2010.
- Reinhart, G.; Egbers, J.: Integrating ability limitations into assembly system design. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability. Heidelberg: Springer 2012, S. 35–40.
- Reinhart, G.; Dollinger, C.; Krippendorf, S.; März, L.: Smart Interface-gesteuerte Springerunterstützung in der Montage. In: ProductivITy, GITO Ver-lag Berlin, 21. Jahrgang, ISSN: 2364-737X, 2016, S. 19-21.
- Statistisches Bundesamt: Pressemitteilung Nr. 511 vom 2. Dezember 2022. <http://www.destatis.de>, letzter Zugriff 12.05.2023
- Storm, A.: Editor, 2020. Gesundheitsreport 2020: Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung. Hamburg: medhochzwei Verlag 2021.
- Tropschuh, B.; Niehues, S.; Reinhart, G.: Measuring physical and mental strain during manual assembly tasks, In Cirp (2021) 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Trost, M.; Claus, T.; Herrmann, F.: Social Sustainability in Production Planning: A Systematic Literature Review. Sustainability (Switzerland), Volume 14, Issue 13, July-1 2022
- Voith Group. SmartDevices, Youtube-Video veröffentlicht 13.06.2019 <https://www.youtube.com/watch?v=1IuPvQ8PUe0>, letzter Zugriff am 22.02.2023.
- Zäh, M. F.; Wagner, W.; Guserle, R.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter mit Hilfe von Roboterunterstützung. Menschengerechte Anpassung von Produktionsstrukturen zur Berücksichtigung des demografischen Wandels. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 3, S. 97–101.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Virtual Commissioning and the Use of Extended Reality and Automated Testing: A Survey of Industry

Virtuelle Inbetriebnahme und die Nutzung von Extended Reality und Automatisiertem Testen: Eine Umfrage in der Industrie

David Kunz, Jacob Weber, Martin Barth, Jörg Franke,
Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen (Germany),
david.kunz@faps.fau.de, jacob.jw.weber@fau.de, martin.barth@faps.fau.de,
jörg.franke@faps.fau.de

Abstract: Virtual Commissioning (VC) is seen as an important technology for managing the complexity of production systems. While it is demonstrated that VC can reduce commissioning time, defect rates and costs, the rate of industrial adoption is below expectations. In this paper, we present the results of a survey conducted to investigate the use, expectations, and barriers to the use of VC with an additional focus on Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Test Automation (TA) in this context. The survey results reveal that just over half of the respondents use VC, albeit rarely to occasionally. Barriers to the use of VC are not technological. VR and AR technologies are used in many companies, but not frequently. The results indicate that the potential benefits of using these technologies are not clear enough to justify further investment in what is seen as a somewhat immature technology. TA can only be found in large companies. The main barriers are the amount of effort required to create and maintain automated tests and a general lack of know-how and resources. Respondents agree that all three technologies will become more important in the future.

1 Introduction

In order to economically manage the increasing complexity of production plant design, it is necessary to identify issues as early as possible. One solution is the use of Virtual Commissioning (VC), which consists of testing and validating partial or full automation systems during the engineering phase using simulation models and methods (VDI/VDE 2018a). The main fields of application are the engineering and commissioning phase of complex automation systems in logistics, manufacturing and assembly (Lechler et al. 2019). As simulation capabilities and tools have improved, the use of VC has increased in recent years, but remains below its perceived potential.

Some notable technologies related to VC are Extended Reality (XR) and Test Automation (TA). XR is an umbrella term for the technologies and concepts surrounding virtual reality (VR), augmented reality (AR) and mixed reality (Çöltekin et al. 2020). XR systems can provide visualisations of automation systems in realistic dimensions. This can improve the decision-making process in the engineering phase by providing a better shared basis for discussion, especially in multi-user environments, and enabling virtual testing of ergonomics and accessibility for production and maintenance.

In general, the term VC encompasses three layers, plant level VC, cell level VC and machine level VC (Reinhart and Wunsch 2007). This publication focuses on the machine level whose main aspect is the testing of control programs on a virtual model of the automation system as would be performed during the actual commissioning of the plant. At present, these tests are typically performed manually. Manual testing involves setting up the starting conditions for the test, manually initiating the test, monitoring the 3D visualisation, behaviour simulation, variables, and PLC program and documenting the results. Due to the required effort, the performed tests mostly cover sections of the program that are considered critical or susceptible to failure. Therefore, there is a risk that parts of the program are forgotten or misjudged and the extent of test coverage is often unclear (Sub et al. 2016). Automated testing has the potential to alleviate these issues. It generally refers to the automation of one or more parts of: test planning and control, test analysis and setup, test execution, test evaluation and test documentation (VDI/VDE 2018b). The concept is commonly utilized in many areas of software development and has been shown to achieve decision coverage comparable to manually created tests for PLC code while saving up to 90% of the time required (Enoiu et al. 2017).

The goal of the survey presented in this paper is to gather feedback from the industry on how VC, VR and AR, and TA in the context of VC are applied and what the main barriers impeding more widespread application are. Based on the results, future focus areas for research and development are derived. First, an overview and distinction from similar studies is given (section 2), followed by an introduction of the survey design and conduct (section 3). The results of the survey are then presented and discussed (section 4). Finally a summary and an outlook are given (section 5).

2 Overview of and Distinction from Similar Studies

Other authors try to answer similar questions using studies and questionnaires. In Shahim and Moller (2016), the goal is to evaluate the tangible and intangible economic benefits of VC through expert interviews and a procedure called Fuzzy Analytic Hierarchy Process. The results indicate that “Deadline control”, “Risk of delay and interruption during ramp up” and “Software quality in relation to future operation” are the three most significant drivers in automation industry with impact on value creation. The study in Reimann (2017) focuses on simulation and visualization. Its results indicate that simulation is mostly used in the concept phase and alongside construction. Close to 50% of participants state they are using simulation for virtual prototypes. 57% expect growth for VC. The main findings of the study looking into the use of simulation in process and discrete industries in Bruckner et al. (2020) are that safety and quality are the main drivers within these

industries, simulation has gained acceptance and simulation is used a lot in all life cycle phases of a production plant.

The results of the 2019 study in IDG Business Media GmbH (2019) indicate that 40% of probed German companies already use VR or AR with an additional 33% planning to implement it in the next 12 months. The authors of Ugarte-Querejeta et al. (2021) investigate the use of and challenges in traditional commissioning (TC), VC, and automated testing for Spanish companies. The most prevalent challenges identified for TC are little margin for error correction, unexpected issues due to errors from previous development stages and time to market. The results also show that most tests in the context of VC are performed manually. The most commonly automated tests are for the validation of PLC, automated at 45% of practitioners' companies.

In summary, the authors of other studies mostly focus on broader applications of digital factories, digital twins or on simulation in a more general sense rather than on the use, benefits and barriers for VC. Furthermore, data on the application of VR and AR in the context of VC and production planning has not been published. Up until now, the pervasiveness of automated testing in VC has only been examined for Spanish companies. Therefore, this study expands the general understanding of the current application of VC in industry particularly of the use of VR, AR and TA.

3 Survey Design and Conduct

Based on the research questions and presented surveys, a questionnaire is created consisting of 31 multiple choice and multiple select questions. A free text option is added where suitable. Overall, the survey is divided into four sections. The first segment contains general questions about the use of VC, followed by questions on the application of VR and AR and automated testing in the context of VC. The final section collects demographic information on the respondents and on their companies. The design of the survey and questions is verified with feedback from several trial participants from research and industry.

The German-language survey was accessible during January and February of 2023. The target group is practitioners from industry which are involved in commissioning or VC as part of their work as system manufacturers, system integrators or manufacturers. Participants in the survey are industry experts from various sectors who were contacted via the authors' mailing lists and social media channels as well as industry newsletters. A total of 30 experts participated especially from machinery and equipment engineering (40%), automotive manufacturing (23%), electrical engineering industry (20%), medical technology sector (17%) and other (13%).

The participating companies are mostly large companies (77%) with some medium (10%) and small companies (13%). Categorized by segment of the supply chain of production plants, these companies are component suppliers (43%), system suppliers (43%), plant operators (30%), engineering service providers (17%) or software companies specialized in PLC or robot programming (10%). The participants themselves are managers (31%), software developers (19%), development engineers (15%) with 33% in the age range of 18-29, 50% aged 30-49 and the remainder 50 or older.

4 Survey Results and Interpretation

The content of the survey is divided into three main sections along which the survey results are analysed and interpreted below. First, the general use of VC is examined in detail (section 4.1), followed by the use of VR and AR in the context of VC (section 4.2). Finally, the application of TA in VC is evaluated (section 4.3).

4.1 Results on Virtual Commissioning

Of the respondents to the survey, 55% apply VC and a further 17% are planning to use it. Here, a medium correlation between the company size and the use of VC can be observed (Cramer-V: 0.482; contingency coefficient: 0.563). Software-in-the-Loop (SIL) (69%) is more common than Hardware-in-the-loop (HIL) (31%) and Model-in-the-Loop (MIL) (31%). Out of the participants using VC most apply it rarely (47%) or occasionally (24%) and few apply it often (18%) or always (12%). The most influential factors which decide whether VC is used or not are plant complexity (68%), availability of resources and personnel (44%), pilot projects (28%) and instructions issued by management (28%).

The participants observed benefits of employing VC fall slightly short of their expectations, see Figure 1. Especially the medium- and long-term savings and improved cause analysis for faults deviate considerably. At the same time, these measures are the most difficult to quantify. In general, the reduction of faults (76%) and time required for commissioning (71%) are observed as the most important benefits, followed by the improved visualisation of the system functionalities (47%).

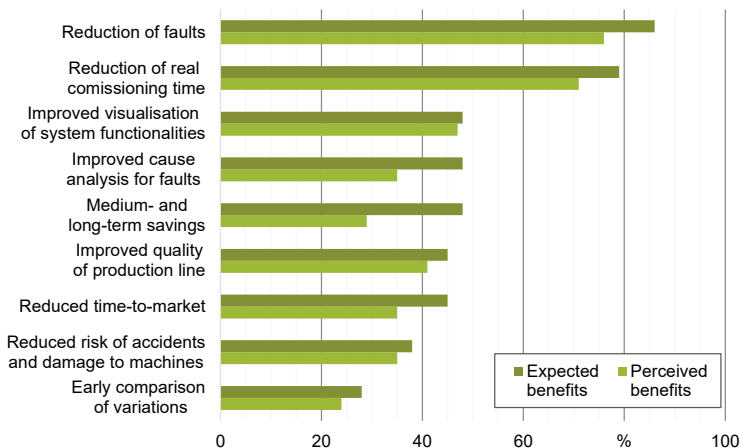


Figure 1: Expected (dark) and perceived (light) benefits of using VC.

Comparing companies that use VC and those that do not, it is clear that the companies that do not use VC expect significantly fewer benefits. It therefore seems as if they are either not aware of the advantages of VC or that VC is not as relevant for their specific business. As shown in Figure 2, the most common barriers to applying VC are resource constraints, i.e. large effort for creating models (89%), lack of resources and staff (61%) and lack of standardization (50%). The majority of the participants

agree (60%) or mostly agree (33%) with the statement “VC will gain in importance in the future”. The remaining 7% answered with “neither agree nor disagree”.

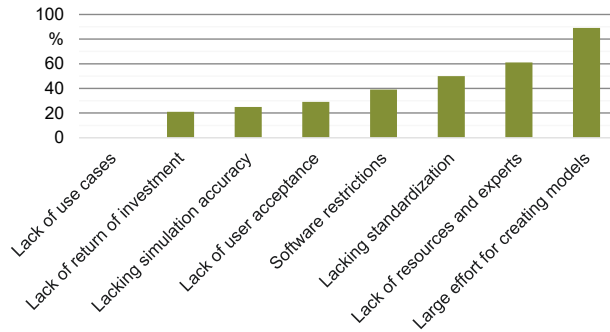


Figure 2: Barriers to applying VC.

In summary, just over half of the respondents use VC. Of these, SIL is the most common, probably due to transferability to the actual hardware. The majority of respondents use VC only rarely to occasionally, with plant complexity, availability of resources and pilot projects as the main motivation. The main expected benefits for applying VC are the reduction of faults and of commissioning time. Barriers to the use of VC are generally related to resource constraints, rather than technological in nature.

4.2 Extended Reality in Virtual Commissioning

Out of the participants’ companies, 64% are using VR or AR technologies. 14% of the remaining companies plan to implement them while a further 14% have no plans to do so. 7% have used at least one of the technologies but discarded it. Here too, a medium correlation with the size of the company can be observed (Cramer-V 0.367; contingency coefficient: 0.461). The majority of respondents using either of the technologies apply them rarely (46%) or occasionally (46%). Only few employ them frequently (4%). VR and AR are mostly applied for the creation of CAD or simulation models of production plants (42%) and training (35%), also compare Figure 3.

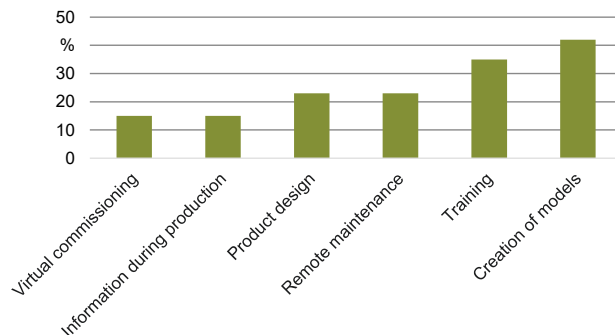


Figure 3: Processes for which AR or VR is used for respondents using either.

The use of VR and AR devices is relatively evenly split between VR-Headsets (46%) AR-Headsets (38%) and handheld AR (38%), i.e. using AR with smartphones or tablets, with some using unspecified other devices (8%). Figure 4 contrasts the expected and perceived benefits of using VR and AR technologies. In general, the technologies meet the expectations. The largest expected benefits are time savings (52%), collaboration without on-site presence (48%) and an accelerated decision-making process (45%). The observed benefits of the former two remain significantly below expectations.

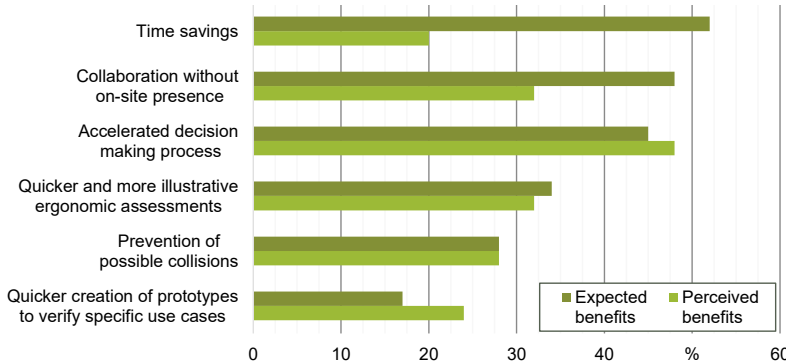


Figure 4: Expected (dark) and perceived (light) benefits of using VR and AR technologies.

In order to assess the barriers for using VR and AR technologies a 5-point Likert scale ranging from “strongly disagree” to “strongly agree” is employed. The answers are translated into numbers ranging from 1 to 5, the mean of which is depicted in Figure 5. The results are mixed. It seems, the economic benefits are not sufficiently clear enough. Furthermore, a lack of know-how and experts persists and the technologies are perceived as somewhat immature.

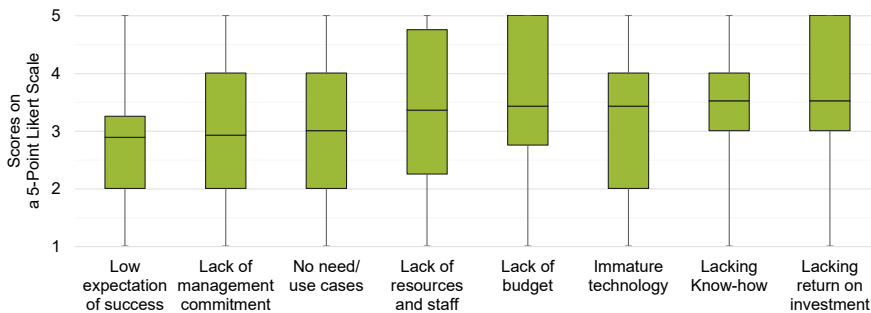


Figure 5: Mean scores on a 5-point Likert scale for barriers to using VR and AR technologies in the context of VC with indicated quartiles and minima and maxima.

30% of the participants agree with the statement “The use of VR and AR technologies in the context of VC will become more significant in the future”, while 47% mostly

agree with the statement. Another 20% neither agree nor disagree and 3% mostly disagree. Respondents whose companies already use VR or AR agree more often.

To summarize, XR technologies are already being used in many organisations, albeit infrequently. The results indicate that many do not use them outside of trials. Expectations for time saving and virtual meetings are not met whereas expectations regarding the support of decision-making processes are. A likely explanation for the former is that it is often difficult to estimate the time savings properly which is underlined by the fact that the faster creation of prototypes to verify specific use cases exceeds expectations. The discrepancy between expectations and observations regarding virtual meetings can be explained by the fact that the technologies have not yet reached the level of sophistication portrayed in media and marketing materials. There are no distinct barriers to the application of VR and AR technologies. However, it seems that the potential benefits are not clear enough to justify investing in technologies that have not fully matured.

4.3 Automated Testing in Virtual Commissioning

Although testing is an important part of VC, only 43% of respondents partially or fully automate tests in the context of VC, while 39% do not. The remainder are unsure whether testing is automated at their company. The responses show that only large companies automate testing. All of the participants who automate testing partially or fully automate test execution (100%). Test evaluation (55%) and test documentation (45%) are also frequently automated, in contrast to test creation (27%), see Figure 6.



Figure 6: Degree of automation of test elements by respondents who automate testing.

Table 1 shows the results for the question of whether the different types of tests are performed and the extent to which they are automated. The most commonly performed tests are PLC/CNC configuration validation (85%), PLC code validation and verification (79%) and collision tests (77%). Of the companies performing the tests, HMI tests are most frequently automated to some extent (83%), followed by validation and verification of PLC code (72%) and validation of CNC subroutines (66%). The lowest levels of automation are for verification of the electrical systems (22%) and controller hardware (25%). These results are consistent with the study of Spanish companies in (Ugarte-Querejeta et al. 2021). It is important to note that the relevance of the types of tests listed is highly company specific.

A 5-point Likert scale is used to assess the expected and perceived benefits of partially or fully automating tests, see Figure 7 for a contrast of their mean values. Expected and perceived benefits are all at or close to “agree” and mostly congruent. Only the long-term savings do not quite match expectations.

Table 1: Overview over the types of performed tests and their extent of automation by respondents' companies that automate testing.

Types of performed tests	Not Executed	Manual	Partially Automated	Fully Automated
Validation of CNC sub-programmes	45 %	18 %	27 %	9 %
Verification of controller-hardware	38 %	46 %	0 %	15 %
HMI tests	38 %	15 %	23 %	23 %
Checking of electronics	31 %	54 %	15 %	0 %
Checking of electrical system	31 %	46 %	23 %	0 %
Collision tests	23 %	38 %	15 %	23 %
PLC code validation and verification	21 %	21 %	43 %	14 %
PLC/CNC configuration validation	8 %	50 %	42 %	0 %

The main barriers to the use of TA are not of technical nature, see Figure 8. Rather, they are related to the high cost of creating and maintaining the automated tests, the uncertain lack of return on investment, and the lack of know-how and resources. Nonetheless, the respondents mostly agree (46%) or agree (35%) that automation of tests in the context of VC will increase in importance, with another 15% neither agreeing nor disagreeing and 4% mostly disagreeing with the statement.

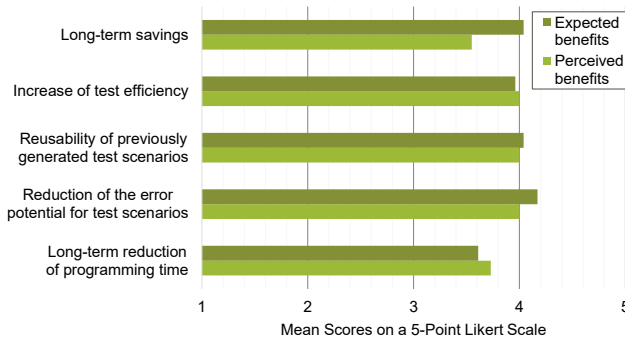


Figure 7: Expected (dark) and perceived (light) benefits of partially or fully automating tests in the context of VC.

TA can only be found in some large companies, with the highest level of automation being for the verification of PLC code and CNC subroutines. The main barriers to further automating tests are not technical, but related to the high effort required to create and maintain automated tests and the lack of know-how and resources. One possible explanation is that bigger companies manage more complex projects which necessitate more extensive testing. At the same time, they have more resources to commit towards experts for TA and more favourable economies of scale. If companies employ TA they commonly use a variety of different types of tests. This could indicate that beginning to automate tests is a big barrier but this justifies further research.

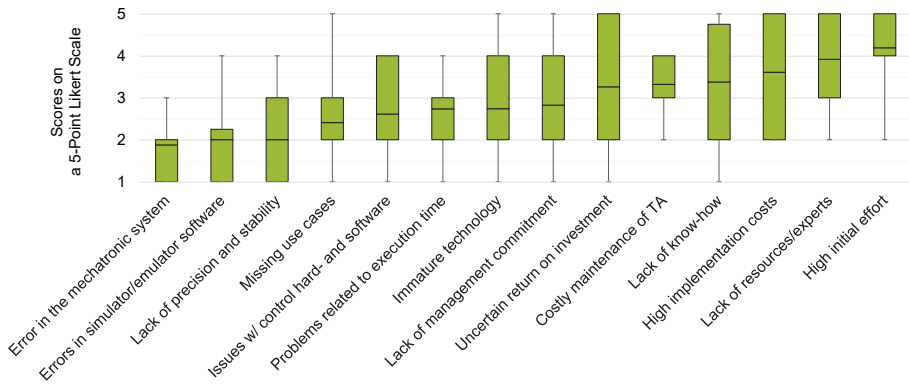


Figure 8: Mean scores on a 5-point Likert scale for barriers to partially or fully automating tests in the context of VC with indicated quartiles and minima and maxima.

5 Summary and Outlook

This study improves the understanding of the current status quo of the use of VC in German companies. Furthermore, it extends the knowledge on prevalence, expectations and barriers of VR and AR as well as TA in the context of VC. Based on the presented results, future research and development focuses can be identified.

For VC, the high effort required to create the models does not always justify the investment. To tilt the scales, further research should focus on reducing the effort to create models and increasing the value of the created models. One possible research avenue for the latter is the extension of VC models to digital twins that can be used to support analysis and decision-making from the concept phase, through design, planning and commissioning, to operation and decommissioning.

In addition to further developing the equipment for VR and AR, the existing benefits and time savings need to be explored and demonstrated more clearly. While many companies have at least trialed the technologies, better integration into existing development processes could help close the gap.

Future investigations in the area of TA in the context of VC should focus on reducing the effort required to create and maintain the automated tests. Assessing how best to support automated test evaluation and documentation, but especially test creation, should be one of the next steps. Furthermore, the knowledge gap in regards to TA in VC needs to be addressed.

Acknowledgements

The presented research is part of project “InterAcDT” which has received funding through VDI/VDE grant “BayVFP Förderlinie Digitalisierung” with the funding reference number DIK0279/01.

References

- Bruckner, L.; Oppelt, M.; Urbas, L.; Barth, M.: The current and future use of simulation in discrete and process industries: Results of a global online survey September 2020, 2020. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:11e2a19a-144c-4d57-9e2a-6fa13101d48a/simulation-survey-report-2020-final.pdf>, accessed 09.02.2023.
- Çöltekin, A.; Lochhead, I.; Madden, M.; Christophe, S.; Devaux, A.; Pettit, C.; Lock, O.; Shukla, S.; Herman, L.; Stachoň, Z.; Kubiček, P.; Snopková, D.; Bernardes, S.; Hedley, N.: Extended Reality in Spatial Sciences: A Review of Research Challenges and Future Directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9 (2020) 7, pp. 439.
- Enoiu, E.; Sundmark, D.; Causevic, A.; Pettersson, P.: A Comparative Study of Manual and Automated Testing for Industrial Control Software. In: 2017 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST), Tokyo, Japan, March 13th-17 March, 2017, pp. 412–417.
- IDG Business Media GmbH: Studie Virtual Reality / Augmented Reality 2019. Unter Mitarbeit von Parametric Technology GmbH, 2019. <https://www.ptc.com/de/resources/augmented-reality/report/ar-vr-studie>, accessed 09.02.2023.
- Lechler, T.; Fischer, E.; Metzner, M.; Mayr, A.; Franke, J.: Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP* 81 (2019), pp. 1125–1130.
- Reimann, G.: Simulation und Visualisierung: Erste Ergebnisse der Trendbefragung, 2017. https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=73419aaf-4755-9875-c462-c9d969b90805&groupId=34570, accessed 09.02.2023.
- Reinhart, G.; Wünsch, G.: Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. *Production Engineering* 1 (2007) 4, pp. 371–379.
- Shahim, N.; Moller, C.: Economic justification of Virtual Commissioning in automation industry. In: 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, DC, USA, December 11th-14th December, 2016, pp. 2430–2441.
- Sub, S.; Magnus, S.; Thron, M.; Zipper, H.; Odefey, U.; Fassler, V.; Strahilov, A.; Klodowski, A.; Bar, T.; Diedrich, C.: Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. In: 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, Germany, August 6th-9th August, 2016, pp. 1–9.
- Ugarte-Querejeta, M.; Etxeberria, L.; Sagardui, G.; Unamuno, G.; Bediaga, I.: Virtual Commissioning in Machine Tool Manufacturing: A Survey from Industry. *DYNA* 96 (2021) 6, pp. 612–619.
- VDI/VDE: Virtual Commissioning - Model types and glossary (2018a) 3693 Part 1.
- VDI/VDE: VDI-Statusreport - Testen vernetzter Systeme für Industrie 4.0, 2018b. <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/testen-vernetzter-systeme-fuer-industrie-40>, accessed 09.02.2023.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation-Based Resolution of Deadlocks in Automated Guided Vehicles using Deep Reinforcement Learning

Simulationsgestützte Lösung von Deadlocks bei fahrerlosen Transportsystemen mit Hilfe von Deep Reinforcement Learning

Mustafa Jelibaghu, Michael Eley, Alexander Palatnik
Technische Hochschule Aschaffenburg, Aschaffenburg (Germany),
{mustafa.jelibaghu, michael.eley, alexander.palatnik}@th-ab.de

Abstract: This paper discusses the use of deep reinforcement learning to resolve deadlocks in material flow systems with automated guided vehicles (AGVs). The paper proposes a strategy for dealing with deadlocks based on a single Agent reinforcement learning approach (SARL). The agent will find the optimal solution strategy in real time. The proposed approach is evaluated using a material flow simulation for a real use case in industry. The effectiveness in reducing the occurrence of deadlocks as well as the number of collisions in the system is demonstrated. This study highlights the potential of deep reinforcement learning for improving the performance and efficiency of material flow systems with AGVs.

1 Introduction

Automated guided vehicles (AGVs) are fleets of autonomous vehicles that transport material or products in warehouses or production environments. AGVs are increasingly used in the logistics industry to automate the internal material flow, as they are more efficient, safer and cost-effective than manual transport systems.

In the process, the vehicles have to carry out the transport orders in compliance with safety and quality standards achieving the required throughput. The planning process for AGV-fleets includes dispatching, scheduling and routing.

- Dispatching refers to the allocation of orders to individual AGVs. Here it is decided which vehicle should take over which order. Dispatching must take into account the available resources, such as the number of AGVs, their capacity and availability, as well as the location and requirements of the orders.
- Scheduling is about determining the processing sequence and transportation times of the orders. The main objective is to optimize the throughput of the material flow while securing due dates.

- Routing is about determining the optimal driving route for each individual vehicle in order to complete the jobs assigned to the vehicle within the given time constraints. Deadlock can occur when the vehicles are following the shortest path calculated by the algorithm and end up in a situation where they are unable to pass each other. This is usually done using an algorithm such as Dijkstra (Javaid 2013), which is based on a directed graph. The directed graph represents the nodes (vehicles and other resources) and edges (connections between the resources) and the algorithm calculates the shortest path between the nodes.

The planning of dispatching, scheduling and routing is crucial for the productivity and efficiency of the internal material flow. Particular attention must be paid to detecting and avoiding deadlocks during routing. Such a deadlock occurs when two or more AGVs block each other and cannot longer continue their journey because they are waiting for each other to release a resource (see Figure 1). This leads to orders not being processed at the planned times or the material flow even coming to a standstill. Deadlocks occur specifically when the problems outlined above are solved one after the other in the specified order. To resolve deadlocks, there are various strategies such as using waiting or changing the route of the individual vehicles (re-routing) (e.g., (Xu et al. 2014), (Hussain et al. 2015)). However, these strategies are not always effective, and resolving one deadlock can lead to another deadlock.

In the classic planning process, these problems are considered one after the other in the specified order. Despite careful planning, so-called deadlocks can occur that can significantly impair the productivity and efficiency of the logistics processes.

In our scenarios we use the power of machine learning approach. Reinforcement Learning (RL) is a possible approach to solving deadlocks in warehouses. RL is a machine learning technique in which an agent makes decisions in an environment through trial-and-error learning in order to maximize a reward. The Deep Q-Network (DQN) Algorithm is a special form of RL based on deep learning and uses the Q-learning method to learn an optimal decision strategy.

The article is structured as follows. The relevant literature is discussed in the section 2. Section 3 describes the simulation environment used. An approach to avoiding deadlocks based on Markov Decision Process (MDP) and DQN is presented in the section 4. The two concluding sections 5 and 6 summarize test results and give an outlook on possible extensions.

2 Literature Review

There are many problem-specific approaches in the literature for deadlock handling. The problem is not only discussed in context of logistics but also in computer science. In addition to the sequential solution of scheduling and routing, approaches are also discussed in the literature in which the two subproblems are solved simultaneously, e.g., (Wang et al. 2019; Vivaldini et al. 2015; Li et al. 2019). In practice, however, the problem often arises with the solutions generated in such wise that the plans determined in this way cannot be implemented as planned due to disruptions in the operational process, and deadlocks therefore arise at other points.

In order to resolve deadlocks, there are various strategies, such as using waiting or changing the route of the individual vehicles (re-routing), e.g., (Xu et al. 2014; Sumanas et al. 2022). However, these strategies are not always effective, and

resolving one deadlock can lead to another deadlock. Deadlocks can be detected by using graph theory. Here, the transport flow is modelled as a directed graph and searched to detect deadlocks. Graph theory is an effective method for detecting deadlocks and is discussed extensively in the literature, e.g., (Yao et al. 2016; Ni et al. 2009; Wang et al. 2013).

The use of machine learning algorithms to prevent deadlocks in a simulation-based learning environment is explored in (Müller et al. 2022). He chooses a RL approach that uses a DQN algorithm to learn a policy for detect and resolution deadlocks. For future research he proposes second approach "Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL)" because the first approach in (Müller et al. 2022) with increasing the number of AGVs brings with it an exponential possible action that an AGV can make in the environment (see Figure 5).

In (Kuhnle 2020), MARL is used. MARL is a popular technique for coordinating agents in complex environments. In the context of an AGV system, MARL can be used to prevent deadlocks by enabling the agents to learn and adapt their behavior based on the system's dynamics and the actions of other agents. To apply MARL to an AGV system, each AGV is modelled as an agent, and the agents are trained to cooperate to avoid deadlocks. MARL is suitable for problems where multiple agents need to collaborate or compete to achieve a common goal, while DQN is suitable for problems where a single agent needs to learn how to take optimal actions in a given environment. Both approaches have their own advantages and limitations, and the choice of approach depends on the specific problem and the requirements of the application.

It is true that Artificial Intelligence (AI) approaches can help solve deadlocks in warehouses more effectively than classic approaches. By using machine learning and other AI techniques, complex algorithms can be created that enable fast and accurate analysis of the warehouse structure and processes. AI systems can also be continually optimized to respond to changes in storage conditions or requirements. When adapting AI approaches to real layouts, however, it must be noted that the examples presented in the literature cannot always be directly transferred to reality. The topology of the warehouse can vary from company to company, and warehouse structures can also change over time within the same company. For this reason, it is important that AI approaches are adapted to the specific needs and requirements of a given warehouse. In order to close the gap between the examples presented in the literature and the requirements in reality, detailed analyses must be carried out to understand the specific conditions and requirements of a bearing. This can be done through the use of data analysis tools and machine learning models applied to real warehouse data. In this way, AI models can be created that are specifically tailored to the needs of the warehouse and can therefore deliver the best results.

3 Simulation Model

As part of the research project, a real application for an AGV system was considered and modelled in Plant Simulation (see Figure 1). The application is a high-bay warehouse with several aisles that the AGVs can only enter and exit from one side (dead ends). There are three AGVs available that have the task of moving pallets from the goods receipt, where the orders are created automatically and assigned to the

AGVs (well known as dispatching), to the high rack. At the beginning the AGVs are located at the park station.

In Plant Simulation, the different strategies for detecting, avoiding and resolving deadlocks will be implemented and compared in terms of their performance. A deadlock situation is shown in Figure 1. The deadlock occurs because the AGV01 currently located on the STR02 wants to enter aisle02. At the same time, the AGV02 wants to leave aisle02.

The simulation model is a digital twin of the logistics system, allowing for experimentation with different scenarios and the optimization of system performance. The model can simulate the movement of materials through the system and track the performance of different components, such as AGVs and conveyor systems. This can help identify potential bottlenecks and areas for improvement.

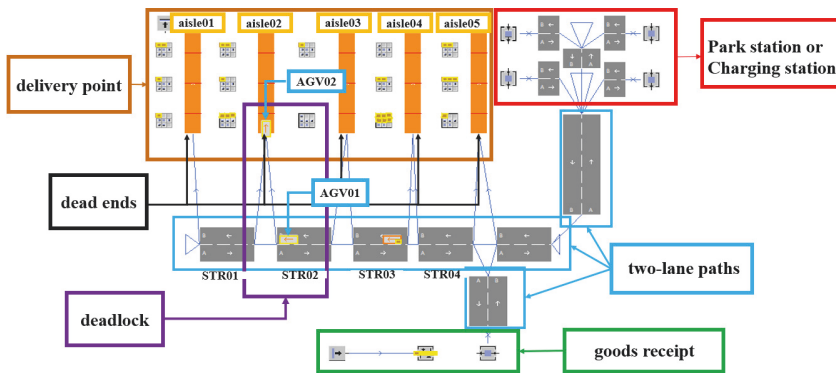


Figure 1: Illustration of a deadlock with three AGVs at the beginning of dead ends

Compared to other approaches in the literature, the complexity of our concept is very high. The number of dead ends and AGVs in the simulation model are realistic. Figure 1 shows that five dead ends and two-lane paths are examined more closely.

4 Deadlock Resolution based on Deep Reinforcement Learning Agent

Reinforcement learning is a branch of machine learning that involves an agent learning to interact with an environment to maximize a reward signal (see Figure 2). The goal is for the agent to learn an optimal policy, which maps states to actions, that maximizes the expected cumulative reward over time.

Formally, reinforcement learning can be described using the Markov Decision Process (MDP) (Sutton and Barto 2005) framework, which consists of the following components:

- State space (S): a set of possible states that the agent can be in.
- Action space (A): a set of possible actions that the agent can take.
- Transition function (T): a function that specifies the probability of moving to a new state given the current state and action.

- Reward function (R): a function that specifies the immediate reward received by the agent for taking a particular action in a particular state.
- Discount factor (γ): a value between 0 and 1 that determines the importance of future rewards relative to immediate rewards.

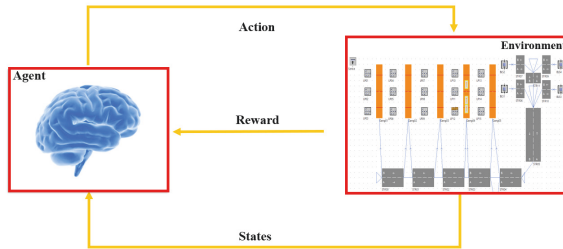


Figure 2: Agent/Environment Interaction

At each time step, the agent observes the current state of the environment, selects an action according to its policy, and receives a reward from the environment. The goal of the agent is to learn a policy that maximizes the expected cumulative reward over time. This can be done using a variety of reinforcement learning algorithms, such as Q-learning, SARSA, and DQN, which use different methods to estimate the optimal policy, e.g., (Müller et al. 2022; Sutton and Barto 2005).

Deep Q-Network is a type of reinforcement learning algorithm that uses a neural network to approximate the Q-value function. The Q-value function represents the expected reward for taking a particular action in a given state and is used to guide the decision-making process in a dynamic environment. In our case we consider the DQN algorithm. Because the Agent can learn from experience, handle complex environments, find optimal policies, and adapt to changing environments.

The DQN algorithm consists of two key components: the neural network and the experience replay memory. The neural network is used to approximate the Q-value function and takes the state of the environment as input and outputs the expected Q-values for each action. The experience replay memory is used to store and randomly sample previous experiences, which helps to stabilize the training process and prevent overfitting.

During training, the DQN agent interacts with the environment by selecting actions based on the current state and the Q-values predicted by the neural network. The agent then receives a reward and observes the new state, which is added to the experience replay memory. The neural network is then updated using a combination of the Bellman equation and stochastic gradient descent, which helps to adjust the Q-values based on the observed rewards and states.

The Bellman equation (1) is a key component of the DQN algorithm and is used to update the Q-values based on the observed rewards and states. The Bellman equation can be written as:

$$Q(s, a) = E[R + \gamma \max(Q(s', a'))] \quad (1)$$

where $Q(s, a)$ is the Q-value for state s and action a , R is the reward received for taking action a in state s , γ is the discount factor, s' is the next state, and a' is the action taken in the next state. The term $\max(Q(s', a'))$ represents the maximum Q-value for the next state s' , and is used to estimate the expected future reward.

The DQN algorithm uses a variation of the Bellman equation, known as the Q-learning update rule, to adjust the Q-values during training. The Q-learning update rule can be written as:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha (R + \gamma \max(Q(s', a')) - Q(s, a)) \quad (2)$$

In equation (2):

- $Q(s, a)$ is the Q-value for state s and action a .
- α is the learning rate, which determines how much the Q-values are updated in each iteration.
- R is the immediate reward for taking action a in state s .
- γ is the discount factor, which determines how much weight to give to future rewards.
- $\max(Q(s', a'))$ is the maximum Q-value over all actions a' in the next state s' .
- $Q(s', a')$ is the Q-value for the next state s' and action a' .

The equation (2) represents the update rule for the Q-values, which are updated after every action taken by the agent in the environment. The goal of the DQN algorithm is to learn the optimal Q-values for all state-action pairs, so that the agent can choose the action that maximizes its expected future reward in any given state.

Overall, the DQN algorithm is a powerful and flexible tool for reinforcement learning, and has been used successfully in a variety of applications, including robotics, game playing, and autonomous driving, e.g., (Lee and Yusuf 2022; Mnih et al. 2013; Friji et al. 2020).

In our simulation model in Figure 1, states s of the AGVs are sent to agents as a matrix input. These possible states are position of the AGVs, velocity of the AGVs, and the position of the destination of the order. These parameters will form our states.

The second important input parameter for an agent is reward or punishment. R is defined as reward. Arriving at its destination, AGV will be awarded with highest reward. The unnecessary steps or movements are seen as punishment. The collisions are defined as punishment. This means that the AGVs try to avoid collisions as much as possible. After the agent has received the following inputs (such as the states of the AGVs and the associated rewards), the agent will perform a random action a based on the Epsilon Greedy algorithm. Possible actions a are defined as moving forward, moving backward, and stop. Based on these actions, the agent will develop its Q-value function.

The Epsilon Greedy algorithm is a simple way to balance exploration and exploitation in the DQN algorithm. During the training phase, the DQN agent must explore the environment to find the optimal policy, but at the same time, it must exploit the information it has learned to maximize the expected reward. The Epsilon Greedy algorithm achieves this balance by allowing the agent to choose the best action with high probability (exploitation), but also randomly select a non-optimal action with low probability (exploration), e.g., (Sutton and Barto 2005; Mignon and Luis de Azevedo da Rocha 2017).

5 Results

The results of the simulation model developed in Plant Simulation and Python were obtained by running a series of experiments to evaluate the effectiveness of the DQN agent in resolving deadlocks in the AGV system. The connection between Plant Simulation and Python was established via the COM interface. The experiments were conducted using a simulated environment that closely mimics real-world AGV systems, including the presence of obstacles, varying task priorities, and traffic congestion.

In the Figure 3, a small number of episodes has been chosen to see if Agent adapts well to the environment. Two scenarios were analysed. The first scenario is to put collision avoidance at the dead end and transfer point. It can be seen in Figure 3 that the collisions in the bearing decrease with the increase in the number of episodes. This means that the agent controls its behaviour and makes good decisions regarding collision avoidance.

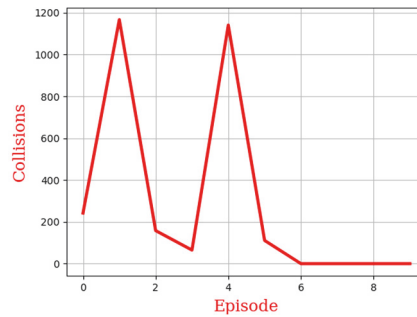


Figure 3: Collisions per episode for three AGVs.

In the second scenario (see Figure 4), the focus will be on using the Agent to teach AGVs how to behave in a storage environment to avoid or resolve deadlocks. The AGVs are trained through trial and error to learn the best actions to take in different situations, with the ultimate goal of avoiding or solving deadlocks that can occur when multiple AGVs are moving at the same time.

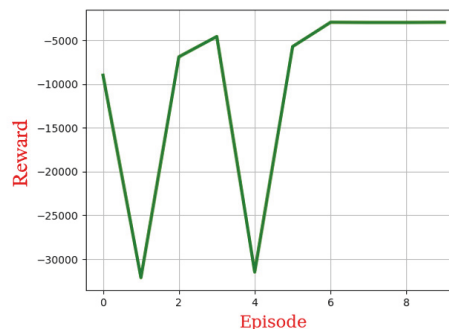


Figure 4: Cumulative rewards per episode for three AGVs.

These illustrations (see Figure 3, Figure 4) show the impact of the DQN agent on the performance of the system and demonstrate its ability to detect and resolve deadlocks more effectively than other Conventional algorithms, e.g., (Yoo et al. 2005; Nguyen and Le 2015).

During the development of the model, it was found that the developed model has a disadvantage with the increase the number of AGVs (see Figure 5). It can be seen very clearly that as the number of AGVs increases, the number of possible actions in the environment increases exponentially.

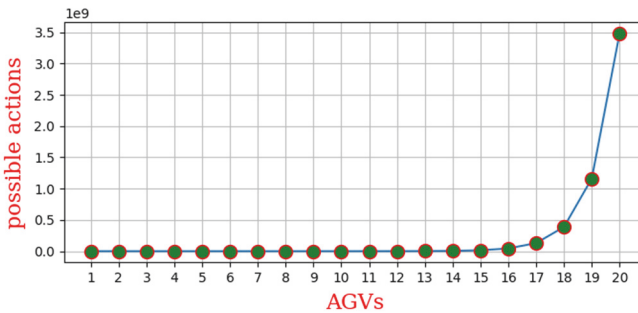


Figure 5: Increase possible actions when increasing the number of AGVs

In conclusion, the simulation model developed in Plant Simulation and Python provides a powerful tool for evaluating the effectiveness of different algorithms in resolving deadlocks in AGV systems. The illustrations generated from the results of the simulation model provides valuable insights into the performance of the system and the potential benefits of using reinforcement learning techniques in the optimization of decision-making processes in complex dynamic environments.

6 Outlook

In fact, the use of neural networks can provide effective solutions to the complex problems associated with material handling systems using AGVs. The machine learning approaches, especially reinforcement learning, allow the analysis of large systems with multiple resources and movements, whereby deadlocks can be detected and avoided before they occur. In addition, reinforcement learning models can learn from past experience and predict optimal solution strategies in real time, reducing the risk of system downtime and increasing overall system efficiency. These methods also provide a more dynamic and adaptive approach to managing material handling systems, allowing the system to respond quickly to changes in demand and capacity. In summary, the integration of neural networks offers a promising avenue to develop effective solutions to detect, avoid and resolve deadlocks in AGV-based material handling systems. Multi Agent Reinforcement Learning has shown to be a powerful technique for solving complex decision-making problems in dynamic environments. In the case of AGV systems, multi-agent reinforcement learning can be particularly useful for detecting deadlocks and resolving them more effectively than other algorithms such as DQN.

Acknowledgement

The research was funded by the Bavarian State Ministry for Economic Affairs, Regional Development and Energy as part of the R&D program "Information and communication technology" of the Free State of Bavaria, project title: KAnIS: Cooperative Autonomous Intralogistics Systems. Project partner: Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg.

References

- Friji, H.; Ghazzai, H.; Besbes, H.; Massoud, Y.: A DQN-based autonomous car-following framework using RGB-D frames. *IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT) 12-16 December 2020 Dubai (2020)*, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GCAIoT51063.2020.9345899>.
- Hussain, S.; Kumar, S.; Janardh, G.: Deadlock avoidance and re-routing of automated guided vehicles in flexible manufacturing systems. *International Journal of Advances in Production and Mechanical Engineering (IJAPME) 1 (2015) 4*.
- Javaid, A.: Understanding Dijkstra's algorithm. *SSRN Electronic Journal (2013)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2340905>.
- Kuhnle, A.: Adaptive order dispatching based on reinforcement learning application in a complex job shop in the semiconductor industry. Ph.D Thesis, *Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany)*. 2020. <https://doi.org/10.5445/IR/1000127740>.
- Lee, M.; Yusuf, H.: Mobile robot navigation using deep reinforcement learning. *Processes 10 (2022) 12*. <https://doi.org/10.3390/pr10122748>.
- Li, X.; Zhang, C.; Yang, W.; Qi, M.: Multi-AGVs conflict free routing and dynamic dispatching strategies for automated warehouse. In: Kim, K.; Kim, H. (Eds.) *Mobile and Wireless Technology 2018. ICMWT 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering 513 (2019)*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1059-1_26.
- Mignon, A.; Luis de Azevedo da Rocha, R.: An adaptive implementation of epsilon-greedy in reinforcement learning. *Procedia Computer Science 109 (2017)*, pp. 1146-1151, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.431>.
- Mnih, V.; Kavukcuoglu, K.; Silver, D.; Graves, A.; Antonoglou, I.; Wierstra, D.; Riedmiller, M.: Playing Atari with deep reinforcement learning. 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.5602>.
- Müller, M.; Reggelin, T.; Kutsenko, I.; Zadek, H.; Reyes-Ruiano, L.: Towards deadlock handling with machine learning in a simulation based learning environment. *Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference 11-14 December 2022 Singapore, 2022*, pp. 1485-1496. <https://doi.org/10.1109/WSC57314.2022.10015270>.
- Nguyen, H.; Le, V.: Detection and avoidance deadlock for resource allocation in heterogeneous distributed platforms. *International Journal of Critical Infrastructures 6 (2015) 2*.
- Ni, Q.; Sun, W.; Ma, S.: Deadlock detection based on resource allocation graph. *Fifth International Conference on Information Assurance and Security, Xi'an, China, 2009*, pp. 135-138, <https://doi.org/10.1109/IAS.2009.64>.

- Sumanas, M.; Petronis, A.; Bucins, V.; Bučinskas, V.; Dzedzickis, A.; Virzonis, D.; Morkvenaite, V.: Deep q-learning in robotics: improvement of accuracy and repeatability. *Sensors* 2022 MDPI 22 (2022) 10. <https://doi.org/10.3390/s22103911>.
- Sutton, R.; Barto, A.: Reinforcement learning: an introduction. *IEEE Transactions on Neural Networks* 16 (2005), pp. 285-286. <https://doi.org/10.1109/TNN.1998.712192>.
- Vivaldini, K.; Rocha, L.; Becker, M.; Moreria, M.: Comprehensive review of the dispatching, scheduling and routing of AGVs. Moreira, Matos, A.; Veiga, A.; G. (Eds.) *CONTROLO'2014 – Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control. Lecture Notes in Electrical Engineering* 321 (2015). https://doi.org/10.1007/978-3-319-10380-8_48.
- Wang, X.; Wang, Q.; Guo, Y.; Lu, J.: Deadlock detection based on parallel graph theory algorithm. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*, 2013, <https://doi.org/10.2991/iccsee.2013.180>.
- Wang, Y.; Li, D.; Ouyang, B.; Wu, D.: Artificial Intelligence empowered multi-AGVs in manufacturing systems. <https://arxiv.org/abs/1909.03373>, accessed January 13th, 2023.
- Xu, J.; Zheng, Z.; Lyu, M.: CGA-based deadlock solving strategies towards vehicle sensing systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2014 (2014). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-214>.
- Yao, B.; Yin, J.; Wu, W.: Deadlock avoidance based on graph theory. *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology* 9 (2016), pp. 353-362. <https://doi.org/10.14257/ijunesst.2016.9.2.34>.
- Yoo, J.; Sim, E.; Cao, C.; Park, J.: An algorithm for deadlock avoidance in an AGV system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26 (2005), pp. 659-668. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-2020-4>.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Herausforderungen für die Projektierung von Mobilen Robotern (FTS und AMR)

Challenges for Deploying Mobile Robots (AGV and AMR)

Maximilian Dilefeld, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden (Germany),
mdilefeld@dualis-it.de / TU Dresden, Dresden (Germany),
maximilian.dilefeld1@tu-dresden.de

Abstract: This paper elaborates the importance of extensive planning when deploying complex intralogistics systems involving Automated Guided Vehicles (AGV) and Autonomous Mobile Robots (AMR). The deployment for such a system is divided into different planning phases. Requirements for the tools which can be used in relation to the objectives in the respective phases are pointed out. An overview for different types of planning tools is given. Important challenges for a realistic implementation of AGVs and AMRs in (3D)-simulation and how they can be overcome is discussed in additional detail in relation to a simulation library developed for Visual Components. A virtual commissioning approach for connecting the real Fleet Manager and other software services that implement material flow logic is presented as a promising approach for Mobile Robot planning.

1 Motivation

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) haben sich seit ihrer Erfindung in den 1950er Jahren zu einem wichtigen Bestandteil der Intralogistik etabliert (Ullrich und Albrecht, 2019). Als wichtiges Werkzeug in automatisierten Transport- und Lagerkonzepten ist in den letzten Jahren eine gesteigerte Nachfrage für FTS zu beobachten (Schmid und Wilke, 2022). Als wichtigster Vorteil für den Einsatz von FTS wird immer wieder die Flexibilität des Systems genannt. Autonome Mobile Roboter (AMR) als Weiterentwicklung dieser Systeme in Hinblick auf Sensorik und Steuerung spielen hierfür eine wichtige Rolle und ermöglichen vielseitige Einsatzzwecke, die über den reinen Transport hinausgehen (Siegwart et al., 2011). Die Vielseitigkeit der am Markt verfügbaren Lösungen sowie die Anpassungsfähigkeit an sich dynamisch ändernde Bedingungen im Fabriklayout sind mit Schwierigkeiten in der korrekten Vorhersage des Systemverhaltens in den verschiedenen Planungsphasen verbunden.

2 Beschreibung

2.1 Planungsprozess

Die Umsetzung eines Projekts mit Mobilen Robotern kann in vier Phasen eingeteilt werden (Abbildung 1), welche unterschiedliche Anforderungen an zu nutzende Planungswerkzeuge stellen.

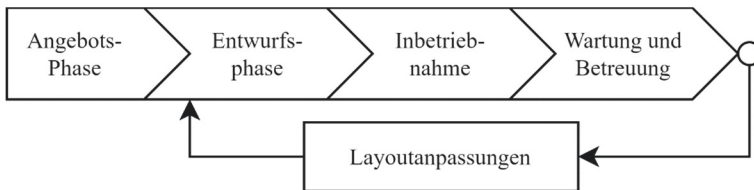


Abbildung 1: Planungsphasen für Anwendungen mit Mobil Robotern

- In der *Konzeptionsphase* liegt ein besonderer Fokus auf der Effizienz der eingesetzten Planungswerkzeuge. Die investierten Aufwände sind so gering wie möglich zu halten. Eine verlässliche Ermittlung der Anzahl der benötigten Fahrzeuge, Stationen und des Zubehörs sind ausschlaggebend für eine korrekte Berechnung der Investitionskosten. Eine Visualisierung des Transportkonzepts kann einen entscheidenden Vorteil in der Diskussion mit dem Projektbeteiligten bieten, insbesondere bei fehlender Erfahrung des Endkunden mit Mobile Robotern.
- Die *Entwurfsphase* verlangt einen höheren Detailgrad. Das Layout wird anhand der verfügbaren Freiheitsgrade (z.B. Positionierung der Stationen, Anpassung der Regelsätze) optimiert. An die Kundenanforderungen angepasste Steuerungsstrategien müssen formuliert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden.
- Die *Inbetriebnahme* bezieht sich sowohl auf die Hardware als auch die Softwaresysteme zur Steuerung des Materialflusses. Das zuvor erarbeitete Steuerungskonzept muss konfiguriert und anteilig implementiert werden. Neuentwicklungen müssen vor der Überführung in ein Produktivsystem validiert werden.
- In der Phase *Wartung und Betreuung* kann die Visualisierung des Systemzustands inkl. Fehlerzuständen einen Mehrwert für Betreiber und Hersteller bieten. Eine vorausschauende Instandhaltung basierend auf Rückmeldungen von der realen Anlage stellen einen weiteren möglichen Anwendungsfall dar.

Ein wesentlicher Vorteil für den Einsatz von Mobil Robotern stellt die Möglichkeit dar, das Transportsystem kontinuierlich zu verbessern und an sich veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Dies ist in Form von Erweiterungen sowie reinen Softwareanpassungen möglich, welche weiteren Planungsbedarf erzeugen.

2.2 Planungswerkzeuge

Die Werkzeuge für den Planungsprozess lassen sich hinsichtlich ihrer Komplexität in vier Hierarchiestufen unterteilen:

- Der *statische Entwurfsansatz* nutzt klassische Berechnungsprogramme, um die benötigte Fahrzeug- und Stationsanzahl zu ermitteln. Wiederverwendbare Vorlagen ermöglichen eine schnelle Lösung ohne spezielle Softwarekenntnisse.

- Als Bestandteil der realen Flottenmanager-Software zur Steuerung der Fahrzeuge bieten einige Anbieter (z.B. Omron, BlueBotics) eine *integrierte Simulation* an. Die reale Steuerungskomponente und dynamisches Fahrzeugverhalten versprechen eine verbesserte Planungsqualität auch für größere Flotten.
- Die *Fabriksimulation* stellt einen holistischen Betrachtungsansatz dar. Dynamische und externe Faktoren werden berücksichtigt. Eine realistische Abbildung von Steuerungslogik und Fahrzeugverhalten ist möglich und Voraussetzung für ein aussagekräftiges Planungsergebnis. Der herstellerunabhängige Ansatz ermöglicht eine Abbildung umfangreicher Systeme mit verschiedenen Fahrzeug-Herstellern und -Typen. Visualisierungsmöglichkeiten von 3D-Simulationsplattformen bieten einen zusätzlichen Vorteil für die Kommunikation mit Projektbeteiligten.
- In einer *virtuellen Inbetriebnahme* (VIBN) werden reale Steuerungsbausteine (z.B. SPS- und Roboterprogramme, Lagerverwaltungssteuerung, Flottenmanager) mit einem digitalen Zwilling verbunden mit dem Ziel, Fehler früher zu erkennen und vor der realen Inbetriebnahme zu beheben (Hoffmann et al. 2010). Eine doppelte Implementierung von Logikbausteinen entfällt, da Änderungen direkt im angebotenen System erfolgen. Das Einbinden realer Steuerungskomponenten ermöglicht eine verglichen mit emulierter Logik verbesserte Planungssicherheit.

Der statische Entwurfsansatz vernachlässigt dynamische Aspekte (z.B. Ladeverhalten, Fahrzeugbegegnungen, schwankende Auftragslage). Ebenso werden, wie auch in der integrierten Simulation in der Flottenmanager-Software, externe Faktoren (z.B. Prozesslogik, Produktionsplan, andere Ressourcen) nicht abgebildet. Verfügbarkeit und Qualität einer integrierten Simulation hängen von der Implementierung des Herstellers ab. Der gemeinsame Einsatz von Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller stellt eine weitere Herausforderung dar (Aloui et al. 2022). Aus den genannten Gründen können diese Werkzeuge große oder steuerungstechnisch komplexe Anlagen nicht oder nur bedingt abbilden.

Die Fabriksimulation besitzt aufgrund des ganzheitlichen Betrachtungsansatzes ein großes Potential als einheitliches Tool für möglichst viele Planungsstufen. Die Implementierung von Mobilen Robotern in den etablierten Simulatoren erweist sich in der Praxis häufig als zu oberflächlich und liefert nicht die erwartete Ergebnisqualität. Notwendige Softwareschulungen, die zeitaufwendige Modellbildung und die umständliche Implementierung von kundenspezifischen Anforderungen im digitalen Modell sowie deren Überführung in das reale System erschweren die Nutzung der Technologie in der Praxis. Der folgende Teil dieses Papers beschäftigt sich mit Anforderungen und möglichen Lösungsansätzen, welche sich aus den genannten Problemen ergeben.

Im Gegensatz zur etablierten VIBN von SPS- und Roboterprogrammen ist eine VIBN des Flottenmanagers kein übliches Werkzeug im Planungsprozess. Die Struktur übergeordneter Steuerungen liegt deutlich näher an der üblichen Funktionsweise von Simulationsmodellen, was verglichen mit SPS- und Roboterprogrammen die Modellbildung des digitalen Zwillings vereinfacht. Wir sehen in der VIBN großes Potential als ergänzendes Werkzeug für die Projektierung von Mobilen Robotern ab einem Projektzeitpunkt, in welchem die realen Steuerungssysteme zur Verfügung stehen.

Neben Schulungsaufwand und zeitaufwändiger Modellbildung besteht die größte Herausforderung in der Kopplung des digitalen Zwillings mit der realen Steuerungskomponente. Die in den letzten Jahren entwickelte VDA5050 Norm stellt eine Bemühung dar, die Kommunikation zwischen Mobilen Robotern und der Leitsteuerung zu

standardisieren. In Bezug auf die Anbindung einer Simulation als digitalen Zwillings sind dagegen noch keine konkreten Kommunikationsschnittstellen verfügbar. Ein wichtiger Bestandteil des vorgestellten Lösungsansatzes ist ein universelles Modell für Fabriksimulation und VIBN. Hierzu soll der Aufbau des Flottenmanagers in der Simulation möglichst nah am realen System gehalten und emulierte Logik durch die Anbindung der realen Steuerungskomponenten überbrückt werden.

2.3 Anforderungen an die Simulation von Mobilien Robotern

In Zusammenarbeit mit Herstellern, Planern und Anwendern wurde auf Basis von Beispielprojekten aus der Praxis ein Anforderungskatalog ausgearbeitet. Die konkreten Punkte können in folgende Bereiche unterteilt werden:

- *Planungsproblematik*: Für die Verwaltung von Fahrzeugen werden Planungsprobleme vom Flottenmanager und anderen Softwaresystemen gelöst. Um einen korrekten Ablauf zu simulieren, müssen Entscheidungen wie im realen System getroffen werden. Um die optimale Steuerungskonfiguration in der Entwurfsphase ermitteln zu können, muss das System flexibel gestaltet werden, um Strategien gegeneinander testen zu können. Ein Konzept für die Implementierung und Validierung von projektspezifischen Zusatzregeln ist notwendig.
- *Variantenreichtum*: Mobile Roboter eignen sich für den Transport verschiedenster Güter und weitere Anwendungsfälle, die über den Produkttransport hinausgehen. Dies zeigt sich auch in einer großen Varianten- und Herstellervielfalt. Parallel eingesetzte Fahrzeuge und Steuerungen müssen gemeinsam simuliert werden.
- *Detailgrad und Genauigkeit*: Ein wesentlicher Kritikpunkt an etablierten Lösungen ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Für eine korrekte Ermittlung der Transportzeiten müssen Navigation und Bewegungsverhalten der Fahrzeuge, insbesondere das Verhalten bei Fahrzeugbegegnungen, realistischer modelliert werden. Ein generischer Ansatz birgt in Anbetracht der Variantenvielfalt das Risiko, Besonderheiten unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte zu stark zu vereinfachen.
- *Bedienkonzept*: Ein möglichst intuitives Bedienkonzept sollte immer Ziel der Softwareentwicklung sein. Eine Erhöhung des Detailgrads und des Variantenreichtums in Verbindung mit einer steigenden Anzahl von Konfigurationsparametern stellt eine besondere Herausforderung dar. Bei den potenziellen Nutzergruppen ist anzunehmen, dass in der Regel keine Programmierkenntnisse beim Bediener vorhanden sind. Anpassungen sollten daher über Konfigurationsparameter und Editoren im grafischen User Interface und nicht im Programmcode erfolgen.
- *Auswertung und Statistiken*: Zur Bewertung simulierter Systeme sowie dem Vergleich von Varianten müssen typische KPIs bereitgestellt werden. Dies schließt die Auswertung der Fahrzeuge (z.B. Auslastung, Anzahl der Transporte), das Netzwerk (z.B. Nutzungsgrad, Stauverhalten / Heatmap), Quelle-Senke-Beziehungen (z.B. Transportdauer, Zykluszeiten), aber auch externe Faktoren wie Prozesse und Puffer ein. Der Nutzer sollte die Möglichkeit haben, diese Kennzahlen mit möglichst geringem Aufwand zu erfassen. Der Vergleich von Varianten ist eine wesentliche Anforderung.

2.4 Umsetzung

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts wurde eine erweiterte Bibliothek zur Simulation von Mobilien Robotern mit der 3D-Simulationsplattform Visual Components

modelliert. Die entwickelten Modelle werden von der DUALIS GmbH IT Solution vertrieben und bereits von einigen Praxispartnern aktiv für die Planung eingesetzt.

2.4.1 Steuerung

Im realen System sind verschiedene Softwaretechnologien an der Steuerung von Mobilen Robotern beteiligt (z.B. MES, Flottenmanager). Die Anzahl der Steuerungskomponenten, die Zuständigkeit sowie deren Vernetzung untereinander variiert in der Praxis. Ullrich und Albrecht (2019) unterteilen die Planungsbereiche einer zentralen Leitsteuerung für FTS in Materialflusssteuerung, Transportauftragsverwaltung, Fahrzeugdisposition und Fahrauftragsabwicklung (Abbildung 2) und beschreiben die Aufgaben der Teilbereiche. Auch autonomer agierende AMRs nutzen in der Praxis eine vergleichbare zentrale Steuerung. Zusätzlich können durch diese Systeme auch Aufträge bearbeiten, die über den reinen Produkttransport hinausgehen. Für diese Aufgaben entfällt der Planungsschritt der Materialflusssteuerung. Die Verwaltung und Vergabe der Aufträge unterscheidet sich nicht von Transporttätigkeiten.

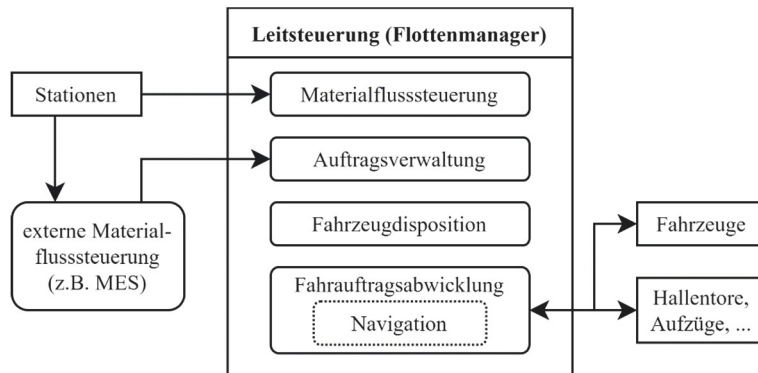


Abbildung 2: Planungsbereiche einer zentralen Leitsteuerung

In der Simulation werden die verschiedenen Planungsprobleme in einer zentralen Controller-Komponente implementiert, welche die Funktionsweise eines realen Flottenmanagers emuliert. Der interne Aufbau des Controllers in der Simulation entspricht dem vorgestellten Aufbau. Dies ermöglicht eine realistische Abarbeitung und den Austausch emulierter Logik mit realen Steuerungskomponenten in der VIBN.

Der implementierte Flottenmanager kann Anforderungen direkt von den Stationen oder bereits zusammengestellte Transportaufträge von der im Simulationstool integrierten Materialflusssteuerung entgegennehmen. Auch eine Anbindung an eine reale Materialflusssteuerung (z.B. MES) ist möglich. Die Implementierung einer eigenen Materialflusssteuerung bietet dem Nutzer mehr Möglichkeiten, Einfluss auf das Herstellen von Quelle-Senke-Beziehungen für die Erzeugung von Transportaufträgen zu nehmen. Übliche Strategien stellen das FIFO-Prinzip, kürzeste Distanz oder manuell festgelegter Prioritäten dar. Weiterhin können auch Abläufe umgesetzt werden, in denen Transportgüter ohne konkreten Bedarf aufgenommen werden.

Zahlreiche vom Nutzer konfigurierte Bedingungen bestimmen, welche Fahrzeuge für die Ausführung eines Auftrags in Frage kommen. Dazu zählen welche Produkttypen und wie viele gleichzeitig ein Mobiler Roboter transportieren kann. Aufträge können

direkt an einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen zugewiesen werden. Dynamische Faktoren, wie der aktuelle Ladezustand oder die Auftragswarteschlange, deren maximale Länge durch den Nutzer konfiguriert werden kann, werden berücksichtigt. Auch wird vor der Zuordnung geprüft, ob die Ziele durch das jeweilige Fahrzeug erreichbar sind.

Die Entscheidungslogik des Flottenmanagers zum Umgang mit entgegengenommenen Aufträgen kann der Nutzer durch die Auswahl verschiedener Strategien beeinflussen. Kriterien für die Sortierung der Auftragswarteschlange sind vom Nutzer festgelegte Prioritäten sowie das Alter (Erstellungszeitpunkt) des Auftrags. Kriterien für die Auswahl des besten Fahrzeugs sind die Entfernung des Mobilen Roboters vom Ziel sowie die Anzahl bzw. prognostizierte Dauer von weiteren Aufgaben, die sich bereits in der Warteschlange des jeweiligen Fahrzeugs befinden.

Der relevanteste Unterschied zwischen FTS und AMRs besteht in der Navigation und Verkehrssteuerung, welche bei klassischen FTS Bestandteil der Fahrauftragsabwicklung ist (Ullrich & Albrecht, 2019). Für die Navigation von AMRs existieren unterschiedliche Ansätze, in welchen unterschiedliche Algorithmen angewendet werden, wie klassische regelbasierte Entscheidungssysteme, evolutionäre Algorithmen (Dang & Nguyen 2016), k-Means-Algorithmus (Elango et al. 2011) und neuronale Fuzzy-Systeme (Al-Aubidy et al. 2015). Dezentrale Systeme besitzen Zugriff auf Karteninformationen zur Streckenberechnung und führen die Navigation auf niedrigstem Level selbstständig durch. Die Mobilten Roboter kommunizieren untereinander und nutzen Sensoren, um Hindernisse zu erkennen. Auch diese autonomen Systeme nutzen die übergeordnete Verkehrssteuerung im Flottenmanager, um Einschränkungen umzusetzen und Deadlocks zu vermeiden (Souto et al. 2021). Für die Simulation spielt es eine untergeordnete Rolle, ob das Verhalten zum Erkennen und Vermeiden von Fahrzeugbegegnungen im Fahrzeug oder in der übergeordneten Steuerung implementiert ist. Wichtig ist, dass Einschränkungen des jeweiligen realen Systems korrekt berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere, ob und wie Fahrzeugbegegnungen bereits in vorausschauender Weise bei der Zusammenstellung der Fahrstrecke berücksichtigt werden können oder erst bei tatsächlicher Begegnung mögliche Alternativstrecken geprüft werden.

2.4.2 *Missionsmanagement*

Um projektspezifische Regeln und Abläufe einfacher modellieren zu können, wurde das manuelle Missions-Management für die Mobilten Roboter entwickelt. Für einzelne Fahrzeuge können mehrere Missionen konfiguriert werden. Der Start einer Mission ist an eine beliebige Anzahl von Bedingungen geknüpft (z.B. Verfügbarkeit oder Bedarf eines bestimmten Transportguts, Ladezustand, Eigenschafts- oder Signalwert eines beliebigen Simulationsobjekts). Pro Fahrzeug kann nur eine Mission aktiv sein. Die Auswahl der nächsten Mission erfolgt auf Basis manuell festgelegter Prioritäten. Eine Mission besteht aus beliebig vielen sequenziell ausgeführten Aufgaben (z.B. Produktaufnahme, Produktabgabe, reiner Fahrbefehl, Ladevorgang) und Kontrollstrukturen (z.B. if-Anweisungen, while-Schleifen, auf Signaleingang warten). Auf diese Weise lassen sich sowohl eine festgelegte Reihenfolge von Stationen abfahren (Routenzug) als auch anwendungsspezifische Entscheidungslogiken implementieren.

Durch die Nutzung eines Editors (Abbildung 3) für die Konfiguration von Missionen werden für den Bediener keine Programmierkenntnisse vorausgesetzt. Der Missionsfortschritt durch einen grünen Punkt auf der rechten Seite des Editors visualisiert.

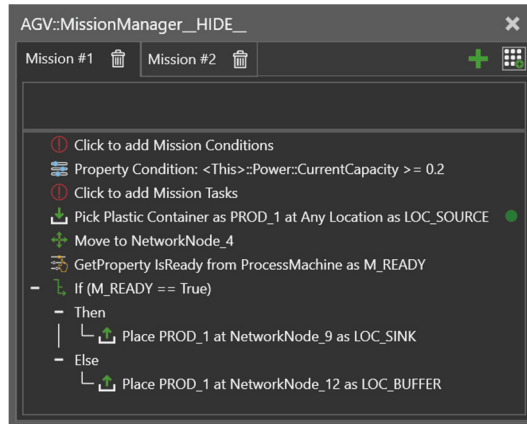


Abbildung 3: Nutzerinterface für den Missionsmanager für einen Mobilen Roboter

2.4.3 Fahrzeuge

Bei der Bibliotheksentwicklung wurden Besonderheiten der zu simulierenden Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Fortbewegungsart sowie beweglicher Achsen für die Produktaufnahme berücksichtigt. Beispielsweise müssen für eine korrekte Abbildung von Staplerfahrzeugen der Gabelhub sowie die korrekte Anfahrt an die Prozesse (Fahrt mit Gabel nach hinten, kollisionsfreie Drehung am Ziel) berücksichtigt werden. Die Fahrweise der Mobilen Roboter (z.B. omnidirektionales Fahrwerk, Lastaufnahme entgegen Fahrtrichtung) und die Anfahrt an einen Prozess kann durch den Nutzer konfiguriert werden und ist unabhängig von den konkreten Fahrzeug-Modellen implementiert, um Kombinationen ermöglichen. Die Unterstützung verschiedener Bewegungsarten stellt weiterhin Anforderungen an die Definition von Fahrwegen im Simulationsmodell, insbesondere bei Fahrtrichtungswechseln. Für ein Staplerfahrzeug, welches sich mit der Lastaufnahme entgegen der Fahrtrichtung bewegt, muss definiert werden, an welcher Position Drehbewegungen durchgeführt und auf welche Höhe die Gabel gehoben werden soll.

Eine weitere Besonderheit stellt die Simulation von Anhängern dar. Das Be- und Entladen von Ladungsträgern kann direkt auf einen am Fahrzeug angebrachten Anhänger durchgeführt werden. Auch das An- und Abkoppeln von fertig beladenen Anhängern an den Quellen und Senken ist denkbar. Eine entsprechende Funktionserweiterung befindet sich noch in der Planung.

Das Erkennen von Hindernissen erfolgt in der Praxis meist über am Fahrzeug angebrachte Sensoren. Es wurde eine Funktion zur Simulation dieser Scanfelder implementiert, welche die Geschwindigkeit des Fahrzeuges reduzieren bzw. dieses komplett stoppen, wenn ein Hindernis innerhalb des definierten Bereichs erkannt wird. Die aktiven Scanfelder unterscheiden sich je nach Situation (z.B. beladener / unbeladener Zustand, Kurvenfahrt, Rückwärtsfahrt). Die explizite Simulation der Sensorik ist mit Nachteilen bezüglich Performance und Modellierungsaufwand verbunden, da in diesem Modus wie im realen System Deadlocks entstehen können. Diese Situationen müssen über die Definition von Regeln zur Verkehrssteuerung vermieden oder über entsprechende Umfahungs- und Ausweichstrategien gelöst werden. Durch die detailliertere Simulation dieses Verhaltens lassen sich zusätzliche Erkenntnisse über

Regeln gewinnen, welche auf das reale System übertragen werden können. Um Mehraufwand für die Modellbildung insbesondere in frühen Projektphasen zu vermeiden, kann alternativ ein vereinfachter rein kapazitätsbasierter Ansatz ausgewählt werden. Bei dieser Abstraktion ist darauf zu achten, dass das Simulationsergebnis im Vergleich zur Realität keine bessere Leistung implizieren darf, als das System leisten kann. Vereinfachungen sollten daher pessimistische Annahmen treffen.

Übliche Funktionen wurden aus dem Standardumfang der Simulationssoftware übernommen und teilweise verbessert. Der Strombedarf der Mobilen Roboter wird anhand von verschiedenen Zuständen definiert (z.B. Fahrt mit / ohne Produkt, Achshub, Idle-Zustand), um den Ladezustand des Akkus zu simulieren. Dabei können Ladevorgänge sowohl an dedizierten Ladestationen als auch induktiv am Prozess simuliert und über verschiedene Regeln angesteuert werden. Die Anzahl und Positionierung der verschiedenen Transportgüter, welche ein Mobiler Roboter zeitgleich aufnehmen kann, wird durch den Nutzer angegeben. Die Fahrgeschwindigkeit wird für verschiedene Zustände definiert (z.B. Fahrt mit / ohne Produkt, Kurvenfahrt, Rotationsgeschwindigkeit) und kann durch externe Faktoren beeinflusst werden (z.B. Scanfelder, manuelle Geschwindigkeitsbegrenzung für bestimmte Streckenbereiche).

2.4.4 Fahrwege

Fahrwege werden als klassisches Netzwerk aus Knoten und Kanten konfiguriert. Die Netzwerkknoten können verschiedene Funktionen erhalten (z.B. Lade- und Idle-Positionen, Produktaufnahme und -abgabe an Prozessen). Die Verbindungen zwischen den Knoten können anhand unterschiedlicher Kriterien eingeschränkt werden (z.B. Fahrtrichtung, maximale Geschwindigkeit, Freigabe nur für bestimmte Fahrzeuge / Produkte / Zielknoten). Verbindungen können Geraden oder Kurven sein.

Dieser Ansatz bietet in der Konfiguration deutliche Vorteile. Das Prinzip eines Netzwerks ist den meisten Nutzern vertraut und Fahrwege können schnell erfasst werden. Der Bediener erhält volle Kontrolle über Fahrbahnen und kann Einschränkungen durch Selektion der Verbindungen und Knoten konfigurieren. Die Erzeugung neuer Knoten und Verbindungen erfolgt über einen Editor. Eine weitere Reduzierung des Modellierungsaufwandes in Bezug auf Fahrstrecken durch Optimierung des Editors und automatische Netzwerkgenerierung sind wesentliche Ziele für die zukünftige Entwicklung.

Der Aufbau der Fahrstrecken entspricht weitestgehend der Funktionsweise klassischer spurgeführter FTS. Für die Navigation vom AMRs muss im realen System zunächst eine Karte aus rauschbelasteten und unsicheren Sensormessdaten erstellt werden. Die darauf aufbauenden Algorithmen zur Bahnplanung sind vielseitig, wobei die Nutzung von Graph Datenbanken einen praxisüblichen Lösungsansatz darstellt (Sariff & Buniyamin, 2003). Somit kann für die Ermittlung von Fahrstrecken in der Simulation der Ansatz für FTS grundlegend auch auf AMRs übertragen werden. Die Ermittlung der Kartendaten unter Berücksichtigung von Hindernissen analog zum realen System ist in der Simulation möglich, setzt jedoch voraus, dass Hindernisse als Objekte in das Simulationsmodell inkludiert werden. Für AMRs sollen verfügbare Fahrstrecken ebenfalls manuell als Netzwerk konfiguriert werden können. Im Gegensatz zu klassischen FTS sollten AMRs das definierte Netzwerk jedoch als Leitlinie interpretieren, von welcher unter Berücksichtigung tatsächlicher verfügbarer Fahrbreiten auch abgewichen werden kann.

2.4.5 Auswertung & Statistiken

Für die Auswertung von Systemen mit Mobilen Robotern werden zusätzliche KPIs bereitgestellt. Für die Auswertung der Fahrstrecken werden die Häufigkeit, Dauer und Zykluszeit für das Befahren einer Netzwerkverbindung sowie die Wartezeit aufgrund von anderen Ressourcen erfasst. Genutzte Routen werden aufgezeichnet und können ausgewertet werden. KPIs für den Mobilen Roboter selbst (z.B. prozentuale Verteilung der Zustände, Auslastung, zurückgelegte Distanz, Anzahl der Transporte) gehören zum Standardumfang des genutzten Simulationstools. Ein wichtiges Argument für den Einsatz von Fabriksimulation ist der holistische Betrachtungsansatz. Daher sollten auch Objekte, mit welchen die Mobilen Roboter interagieren (insb. Stationen, Prozesspunkte, Puffer, andere Ressourcen), in die Auswertung einbezogen werden.

Um die Auswertung und den Vergleich von Layoutvarianten zu vereinfachen, wurde ein Reporting-Modul entwickelt, welches automatisiert Kennzahlen erfasst und in einen standardisierten Excel-Report exportiert. Dieses Werkzeug lässt sich für alle mit Visual Components erstellten Simulationsmodelle anwenden und wurde für die Auswertung von Mobilen Robotern um die zuvor genannten KPIs erweitert.

3 Ergebnisse

Die vorgestellte Modellbibliothek für Visual Components wurde in verschiedenen Praxisprojekten eingesetzt und erfolgreich getestet. Es wurde der Produkttransport mit 6 AMRs zwischen SMD-Linien zunächst mit den Standardmitteln und anschließend mit der neu entwickelten Bibliothek modelliert. In einem weiteren Projekt mit 12 Mobilen Robotern wurde unsere Implementierung mit Plant Simulation verglichen. Dabei wurden die getroffenen Planungsentscheidungen als nachvollziehbar und der realen Steuerungskomponente entsprechend bewertet. Die Bewegung der Mobilen Roboter und Fahrzeiten werden detaillierter und realitätsnaher berechnet und visualisiert. Ein wesentlicher Erfolg besteht in einer Verbesserung der Variantenvielfalt und Flexibilität. Mehrere realisierte Projekte waren mit den Standardmitteln nicht oder nur mit großer Ungenauigkeit in der Simulation umzusetzen.

Insbesondere die simulationsrelevanten Unterschiede zwischen FTS und AMRs sollten in Zukunft genauer betrachtet werden. Für Ausweichvorgänge entgegenkommender AMRs, bei denen in breiten Bereichen die vorgegebene Fahrstrecke verlassen wird, fehlt zum aktuellen Zeitpunkt eine ausreichend genaue Implementierung.

Gleichzeitig wurde auf die Bedienbarkeit großer Wert gelegt, um den Zeitaufwand zur Erstellung von Simulationsmodellen zu reduzieren. Bei gleichzeitiger Steigerung des Funktionsumfanges konnte der Schulungsaufwand sowie die Modellbildung jedoch nicht verkürzt werden. Einen wichtigen Fokus besitzt der Import von existierenden Daten aus vorgelagerten Planungsschritten sowie die Bereitstellung von Daten, um den Zeitaufwand für den Planungsprozess insgesamt zu verringern. Zeitaufwändige Toolwechsel können reduziert werden, wenn die Simulation als einheitliches Werkzeug in möglichst vielen Planungsschritten etabliert werden kann.

Die Möglichkeit zur direkten Nachnutzung eines Simulationsmodells für die Fabriksimulation als digitalen Zwilling für die Virtuelle Inbetriebnahme stößt bei Praxisanwendern auf großes Interesse. Die Umsetzung eines Demonstrators für die Anbindung eines realen Flottenmanagers stellt einen wichtigen nächsten Schritt dar.

Literatur

- Al-Aubidy, K.M., Ali, M.M., Derbas, A.M.: Multi-robot task scheduling and routing using neuro-fuzzy control, in: 2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15) (2015).
- Aloui, K.; Hammadi, M.; Guizani, A.; Soriano, T.; Haddar, M.: Development of an AGV System Using MBSE Method and Multi-agents' Technology. In: Walha, L.; Jarraya, A.; Djemal, F.; Chouchane, M.; Aifaoui, N.; Chaari, F.; Abdennadher, M.; Benamara, A.; Haddar, M. (Hrsg.): Design and Modeling of Mechanical Systems - V, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing 2022, S. 103–114.
- Dang, Q.-V., Nguyen, L.: A Heuristic Approach to Schedule Mobile Robots in Flexible Manufacturing Environments. *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use 40 (2016), S. 390–395.
- Elango, M., Nachiappan, S., Tiwari, M.K.: Balancing task allocation in multi-robot systems using K-means clustering and auction based mechanisms. *Expert Systems with Applications* 38 (2011), S. 6486–6491.
- Grznar, P.; Gregor, M.; Gaso, M.; Gabajova, G.; Schickerle, M.; Burganova, N.: Dynamic Simulation Tool for Planning and Optimisation of Supply Process. *Int. j. simul. model.* 20 (2021), S. 441–452.
- Hoffmann, P.; Maksoud, T.M.A.; Schumann, R.; Premier, G.C.: Virtual Commissioning Of Manufacturing Systems A Review And New Approaches For Simplification. In: 24th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2010 Proceedings. Kuala Lumpur (Malaysia) 2010, S. 175–181.
- Law, A.M.; Simulation modeling and analysis, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. Tucson, Arizona (USA): McGraw-Hill Education (2015) 5.
- Lee, C.G; Park, S.C.; Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. *Journal of Computational Design and Engineering* 1 (2014), S. 213–222.
- Sariff, N.; Buniyamin, N.: An Overview of Autonomous Mobile Robot Path Planning Algorithms. 4th Student Conference on Research and Development (2006), S. 183-188.
- Schmid, K.; Wilke, P.: Branchenanalyse Fördertechnik und Intralogistik: Perspektiven für Arbeit und Beschäftigung (Working Paper No. 235). Working Paper Forschungsförderung 2022.
- Siegwart, R.; Nourbakhsh, I.R.; Scaramuzza, D.: Introduction to Autonomous Mobile Robots, second edition. MIT Press 2011.
- Souto, A., Prates, P.A., Lourenço, A., Al Maamari, M.S., Marques, F., Taranta, D., DoÓ, L., Mendonça, R., Barata, J.: Fleet Management System for Autonomous Mobile Robots in Secure Shop-floor Environments, in: 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (2021).
- Ullrich, G.; Albrecht, T.: Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019.
- Wu, G.; Sun, X.: AGV Task Distribution Study. *Journal of Physics: Conference Series* 1486 (2020).

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Ereignisdiskrete Modellierung autonomer Transportfahrzeuge mittels Open-Source Software

Discrete-event modelling of autonomous transport vehicles using open-source software

Viktor Artiushenko, Marcel Müller, Tobias Reggelin, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany), viktor.artiushenko@ovgu.de, marcell.mueller@ovgu.de, tobias.reggelin@ovgu.de

Sebastian Lang, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung (IFF), Magdeburg (Germany), sebastian.lang@iff.fraunhofer.de

Abstract: This contribution addresses the need for improved methods in modelling and simulating transportation vehicles in discrete event simulation (DES), since current commercial software solutions suffer from a limited adaptability, high costs, and slow performance. We introduce an object class that enables the addition of freely moving transport resources to open-source DES libraries, including collision-free motion modelling. Applicable to all object-oriented programming languages, this class design extends the functionality of existing open-source software. A component for an intralogistics transport vehicle was developed for the Python library Salabim, and its functionality was successfully verified in a two-vehicle simulation environment.

1 Einleitung

Simulationsstudien zum Materialfluss zielen im operativen Betrieb gewöhnlich darauf ab, Transport- und Lagerkosten zu reduzieren und letztendlich die Produktionszeit zu verkürzen, was zu einem wichtigen Wettbewerbsvorteil werden kann. Für die Analyse von Materialflüssen eignen sich ereignisdiskrete Simulationsmodelle (DES – vom engl. Begriff „Discrete Event Simulation“) (Alves et al. 2009). Mittels DES können Systeme und Prozesse unterschiedlicher Komplexität und in einem beliebigen Detaillierungsgrad abgebildet werden. Durch DES werden in der Produktion primär die Produktionsplanung und -steuerung, Leistungsbewertung von Produktionssystemen, Supply-Chain-Optimierung, sowie das Bestandsmanagement unterstützt (Tako und Robinson 2012).

Die Transportfahrzeuge und deren Management spielen bei der Materialflussplanung eine wichtige Rolle, um sicherzustellen, dass das richtige Material zur richtigen Zeit

am richtigen Ort zur Verfügung steht. Mit Transportfahrzeugen sind in diesem Beitrag sowohl konventionelle Gabelstapler als auch moderne autonome Mittel wie fahrerlose Transportsysteme (FTS) oder autonome mobile Roboter (AMR) gemeint.

In den letzten Jahrzehnten wurden Probleme der Materialflussplanung in Produktionssystemen mit Transportfahrzeugen in mehreren Publikationen, wie beispielsweise von Herazo-Padilla et al. (2013), Sun et al. (2018), Fransen et al. (2020), Müller et al. (2022), Kousi et al. (2019) mittels Simulationen analysiert. Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass in den meisten wissenschaftlichen Arbeiten kommerzielle Softwarelösungen zur Optimierung des Materialflusses verwendet wurden. In einigen dieser Arbeiten wurden jedoch nur sehr abstrakte Modellbeschreibungen für die Abbildung der Transportvorgänge verwendet. Dies liegt daran, dass die Integration von Intralogistikfahrzeugen mit komplexem Verhalten in ereignisdiskrete Simulationsumgebungen mehrere Einschränkungen aufweist.

Moderne kommerzielle Softwarelösungen ermöglichen die Modellierung und Simulation von Materialflüssen. Sie verfügen in der Regel über fertige Drag-and-Drop-Elemente zur Modellierung von Transportsystemen mit vordefinierten Eigenschaften. Für eine detaillierte und realitätsnahe Abbildung des Fahrzeugverhaltens (z.B. dynamische Bewegungssteuerung) sollen sie jedoch oft mit externen Algorithmen integriert werden. Da die Kommunikation über zusätzliche Schnittstellen und Protokolle erfolgt und nicht alles in einem integrierten Programm abläuft, arbeiten diese kommerziellen Werkzeuge langsamer als üblich. Auch in diesem Fall ist die Anpassbarkeit eingeschränkt, da kein Zugriff auf den Quellcode dieser Software möglich ist (Peyman et al. 2021).

Dieses Problem wurde zuvor auch von Peyman et al. (2021) identifiziert. Sie haben Python mit verschiedenen kommerziellen DES-Werkzeugen kombiniert, um ein realitätsgetreueres Fahrzeugverhalten zu erzielen. Aufgrund der eingeschränkten Funktionalität der Python-APIs konnten sie jedoch nicht die Flexibilität einer reinen Open-Source-Implementierung erreichen.

Hinzu kommen die Lizenzpreise für kommerzielle Simulationswerkzeuge. Sie sind sowohl für Unternehmen als auch für Forschungseinrichtungen mit begrenztem Budget nicht immer vernachlässigbar. Das beeinträchtigt ihre Wettbewerbsfähigkeit und verlangsamt den technischen Fortschritt in diesem Bereich.

Eine potentielle Lösung versprechen Open-Source Bibliotheken für DES. Neben der hohen Anpassbarkeit bieten sie Interoperabilität, d.h. Benutzer*innen sind nicht von einem einzigen Anbieter*innen abhängig. Die existierenden Open-Source Lösungen bieten jedoch meist keine fertigen Referenzmodelle für die Abbildung von Fahrzeugen und deren Verhalten an, welche direkt in ein Simulationsmodell eingebettet werden können. Sie müssen deswegen meist von Grund auf programmiert werden, was zeitaufwendig ist und gute Programmier- und Domänenkenntnisse erfordert.

Im Beitrag von Reith et al. (2021) wurde eine allgemeine Struktur des möglichen Open-Source Simulationsframeworks zur Modellierung der Transportprozesse dargestellt. Zudem gibt es in der Literatur bisher kein detailliertes Vorgehen für die Erstellung und Integration von Transportfahrzeugen in Open-Source DES-Simulationsumgebungen. Dieser Beitrag soll helfen, diese Lücke zu schließen.

2 Zugrundeliegende Annahmen

Um die komplexen Zusammenhänge, die bei der Bewegung von Fahrzeugen auftreten, zu vereinfachen, wurden in diesem Beitrag diese Annahmen bei der Entwicklung der Objektklasse und der nachfolgenden Berechnungsmethoden getroffen:

1. Die Fahrzeuggeometrie wird zu einer rechteckigen Form vereinfacht
2. Brems- und Beschleunigungswerte der Fahrzeuge werden zunächst nicht betrachtet, da diese Eigenschaften nicht direkt aus den technischen Unterlagen entnommen, sondern nur empirisch ermittelt werden können. Außerdem sind sie stark von anderen Faktoren wie Fahrzeugbelastung, Radzustand usw. abhängig.
3. Der Sicherheitsabstand ε wird eingeführt, um die vorgenommenen Vereinfachungen auszugleichen. Je höher ε ist, desto sicherer ist die generierte Trajektorie. Jedoch gehen mit zunehmenden ε womöglich Optimierungspotentiale für eine weg- oder zeitminimale Trajektorie abhanden.

3 Entwurf der Objektklasse für Transportressourcen

In Rahmen dieses Beitrags wurde eine Klasse erstellt, welche direkt in bestehende Strukturen der Open-Source DES-Bibliotheken eingebunden werden kann. Eine Klasse ist ein grundlegendes Konzept in objektorientierten Programmiersprachen und dient der Definition von Objekten. Sie besteht aus Attributen, welche die Eigenschaften oder Merkmale der Objekte repräsentieren, und Methoden, die das Verhalten der Objekte abbilden.

Zuerst wurden die Attribute festgelegt. Dies sind die Merkmale, die allen Fahrzeugen gemeinsam sind und mit denen sie dargestellt werden können. Dazu gehören sowohl physikalische (Abmessungen, Radkonstruktion usw.) und dynamische Merkmale (z. B. Höchstgeschwindigkeit) als auch Parameter, die für die Interaktion mit der DES-Umgebung und für die Bewegungssteuerung erforderlich sind. Die vollständige Liste der Attribute ist in Tabelle 1 enthalten.

Zusätzlich zu den Attributen sind bestimmte Methoden erforderlich, um die grundlegenden Funktionalitäten der Fahrzeugklasse sicherzustellen. Dazu gehören unter anderem die Überprüfung einer möglichen Kollision zwischen Fahrzeugen und die Auswahl von geeigneten Kollisionsvermeidungsmaßnahmen. Wie diese umgesetzt werden, wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Die als grundsätzlich notwendig erachteten Methoden sind in Tabelle 1 aufgelistet. Diese Liste kann anders gegliedert und bei Bedarf um weitere Methoden ergänzt werden.

Von dieser können weitere Klassen abgeleitet werden, die von der Basisklasse „Transportfahrzeug“ erben und diese um weitere spezifische Attribute und Methoden ergänzen. So können verschiedene Fahrzeugtypen implementiert werden (z.B. Subklasse „Gabelstapler“ oder „AMR“). Die Elemente werden dann als Klassenobjekte in die Simulationsumgebung eingefügt.

Nach diesem Klasseentwurf können Fahrzeuge in Open-Source DES-Softwarelösungen in allen objektorientierten Programmiersprachen implementiert werden.

Tabelle 1: Entwurf der Objektklasse „Transportfahrzeug“

 Klasse „Transportfahrzeug“

Attribute (verändern sich nach der Initialisierung nicht):

fahrzeug_id:	Eindeutiger Identifikator für das Fahrzeug
rad_typ:	Typ der Räder (definiert, welche Ausweichmanöver ausgeführt werden können)
l und b:	Abmessungen (Länge und Breite) des Fahrzeugs
max_geschw:	maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs
max_zuladung:	maximale Zuladung, die das Fahrzeug tragen kann

Attribute (verändern sich dynamisch nach der Initialisierung):

geschw:	aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs
ladung:	Menge der Ladung, die das Fahrzeug derzeit trägt
position:	Aktuelle Position des Fahrzeugs in einem Koordinatensystem (z.B. (x, y))
richtung:	aktuelle Fahrtrichtung des Fahrzeugs in Grad (0 bis 359) oder Radiant (diese Information kann verwendet werden, um zu ermitteln, ob Fahrzeuge auf Kollisionskurs sind und um bei Bedarf Ausweichmanöver zu planen)
status:	aktueller Status des Fahrzeugs (z. B. frei, in Betrieb usw.).
koll_vermeiden:	boolescher Wert zur Anzeige des Kollisionsvermeidungszustands (ermöglicht Koordination mit Fahrzeugen oder Verkehrsmanagementsystemen)
traj:	Der zugewiesene vordefinierte Pfad, bestehend aus einer Liste von Punkten

Methoden:

process():	Basismethode für die Interaktion des Fahrzeugs mit der DES-Simulationsumgebung
animate():	Visualisiert das Fahrzeug und dessen Trajektorie auf einer gegebenen Zeichenfläche
setze_traj():	Legt eine neue Trajektorie für das Fahrzeug fest
kann_koll():	Prüft, ob dieses Fahrzeug mit anderem in ereignisdiskreter Simulationsumgebung potenziell kollidieren kann
koll_maßnahme():	Methode zur Auswahl einer Kollisionsvermeidungsmaßnahme

4 Dynamische Bewegungssteuerung

Die Bewegungsplanung erfolgt in diesem Beitrag nach Reith et al. (2021) in zwei Phasen. In der ersten Phase werden die optimalen Routen für alle Fahrzeuge zentral ermittelt. Dies wird in der Regel durch A*- oder Dijkstra-Algorithmen realisiert. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Abbildung der Transportressourcen und deren Verhalten in der Open Source Simulationssoftware DES liegt, wurde das Problem der Pfadfindung nicht betrachtet und dementsprechend diese Algorithmen nicht

implementiert. In der zweiten Phase werden die Bewegungen der einzelnen Agenten (Transportmittel) dezentral an die Umgebungsbedingungen angepasst.

Eine Fahrzeugbewegung ist ein zeitlich kontinuierlicher Prozess, der in DES-Modellen über endlich viele Ereignisse approximiert werden muss. Zu diesem Zweck werden künstliche Ereignisse in vordefinierten Zeitabständen eingeführt. Die Zeitabstände resultieren aus der Unterteilung des zurückzulegenden Wegs in mehrere Wegpunkte. An jedem Wegpunkt findet ein Ereignis statt, durch welches die Positions- und Bewegungsattribute der Fahrzeuge aktualisiert werden. Hierdurch kann überprüft werden, ob zum Zeitpunkt des Ereignisses neue Kollisions- und Deadlockgefährdungen auftreten. Wenn dies der Fall ist, werden vorbeugende Maßnahmen (z. B. Geschwindigkeitsanpassung, Ausweichmanöver) ergriffen.

4.1 Erkennen von Gefahrensituationen

Die frühzeitige Erkennung möglicher Kollisionen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird festgestellt, ob sich die beiden Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe zueinander befinden. Dazu werden Kreisflächen mit einem bestimmten Durchmesser um die Fahrzeuge gezogen. Der Durchmesser hängt von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge ab (Je höher die Geschwindigkeit, desto größer der Durchmesser). Überschneiden sie sich, werden im Folgenden die Positionen $(x_i; y_i)$ der Fahrzeuge im aktuellen $(x_{iT}; y_{iT})$ und im vorherigen $(x_{i(T-1)}; y_{i(T-1)})$ Ereignis herangezogen. Anhand dieser Informationen kann festgestellt werden, ob sich die Fahrzeuge einander nähern und wenn ja, welche Art von Kollision möglich ist: Frontal-, Heck- oder Seitenaufprall.

Dazu berechnet man zunächst die Winkel zwischen zwei Richtungsvektoren:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_1| \cdot |\vec{r}_2|} \tag{1}$$

\vec{r}_i bezeichnet den Richtungsvektor, der folgenderweise ermittelt wird:

$$\vec{r}_i = \{x_{iT} - x_{i(T-1)}; y_{iT} - y_{i(T-1)}\} \tag{2}$$

Anschließend wird ermittelt, wie sich der Abstand der Fahrzeuge zwischen zwei benachbarten Ereignissen verändert hat. Die Entfernung zwischen Fahrzeugen vor dem Zeitschritt in der DES-Umgebung wird wie folgt berechnet:

$$d_{T-1} = \sqrt{(x_{2(T-1)} - x_{1(T-1)})^2 + (y_{2(T-1)} - y_{1(T-1)})^2} \tag{3}$$

Analog wird die Entfernung nach dem Zeitschritt (d_T) bestimmt. Die möglichen Kollisionsarten und die Kriterien, nach denen sie klassifiziert werden, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Kriterien für die Kollisionsklassifizierung

Szenario	Kollisionskriterien
Frontalaufprall	$(\theta = 180^\circ) \wedge (d_T < d_{T-1}) \wedge ((x_{1T} = x_{2T}) \wedge (y_{1T} = y_{2T}))$
Heckaufprall	$(\theta = 0^\circ) \wedge (d_T < d_{T-1}) \wedge ((x_{1T} = x_{2T}) \vee (y_{1T} = y_{2T}))$
Seitenaufprall	$(0^\circ < \theta < 180^\circ) \wedge (d_T < d_{T-1})$

Durch diese Voranalyse kann frühzeitig erkannt werden, ob ein Kollisionsrisiko besteht, und wenn nicht, kann auf die Einführung zusätzlicher Ereignisse und fortgeschrittener Berechnungen verzichtet werden, was im Hinblick auf eine effiziente DES von Bedeutung ist.

4.2 Eingriffsentscheidung

Wenn im ersten Schritt festgestellt wurde, dass ein Kollisionsrisiko besteht, wird eine detaillierte Analyse durchgeführt. Diese basiert auf der erweiterten Time-to-Collision (TTC)-Berechnungsmethode nach Jiménez et al. (2013) unter Berücksichtigung der in diesem Beitrag getroffenen Annahmen. TTC ist die Zeit, die vergeht, bevor es zu einem Zusammenstoß zwischen den beteiligten Fahrzeugen kommt, sofern sich ihre Geschwindigkeiten nicht ändern und sie ihre Fahrwege beibehalten.

Auf Grundlage der Berechnungsergebnisse wird entschieden, ob Eingriffe zur Kollisionsvermeidung erforderlich sind. Dabei werden die Abmessungen, die Geschwindigkeit und die Ausrichtung der Fahrzeuge in Betracht gezogen. Abhängig von der Art der Kollision gelten unterschiedliche Berechnungsformeln.

Für das Szenario mit möglichen Heckaufprall (siehe Abbildung 1(a)) gilt die folgende Bedingung:

$$T < \frac{x_2 - x_1 - \frac{l_2}{2} - \frac{l_1}{2} - \varepsilon}{v_1 - v_2} \quad (4)$$

Der Parameter T ist dabei die Zeit bis zum nächsten Ereignis. Fahren die Fahrzeuge entlang Y-Achse, soll x in der Formel durch y ersetzt werden. Solange diese Bedingung erfüllt ist, besteht kein Handlungsbedarf. Andernfalls muss die Geschwindigkeit des auffahrenden Fahrzeugs reduziert werden, um eine Kollision zu vermeiden:

$$v_1 = v_2 \quad (5)$$

Wenn sich die Fahrzeuge in einem Winkel (θ) zueinander bewegen (siehe Abbildung 1 (b) und (d)) und folgende Bedingungen erfüllt ist, ist kein Eingreifen erforderlich:

$$\frac{(l_1 + d_{c1} + \varepsilon) \cos \alpha_1 + \frac{w_2}{2 \sin \theta} + \frac{w_1 \cot \theta}{2}}{v_1} < \frac{(d_{c2} + \frac{l_2}{2}) \cos \alpha_2 - \frac{\frac{w_1}{2} + \varepsilon}{\sin \theta}}{v_2} \quad (6)$$

In dieser Formel sind d_{ci} die jeweiligen Abstände der beiden Fahrzeuge vom Schnittpunkt ihrer Trajektorien und α_i die jeweiligen Orientierungen bezüglich der X-Achse. Bei Nichterfüllung der Bedingung ist eine Reduzierung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs erforderlich, das sich dem Kollisionspunkt als Letztes nähert. Die neue Geschwindigkeit ist der Höchstwert, bei dem die Bedingung erfüllt ist.

Wenn die Gefahr eines Frontalzusammenstoßes zwischen Fahrzeugen besteht (siehe Abbildung 1 (c)), sind mehrere Szenarien zu betrachten. Im ersten Fall ändert eines der Fahrzeuge die Fahrtrichtung und es wird folgende Bedingung für die Entscheidungsfindung verwendet:

$$\frac{d_{A1}}{v_1} < \frac{d_{A2} - R + \frac{\pi R}{2} + \frac{l_2}{2} + \varepsilon}{v_2} \quad (7)$$

Dabei sind d_{A1} und d_{A2} die jeweiligen Abstände der beiden Fahrzeuge zum Abbiegepunkt, R ist der Abbiegeradius und Fahrzeug 2 wird abbiegen.

Ist diese Ungleichheit erfüllt, muss Fahrzeug, das geradeaus fährt, abbremsen. Die neue Geschwindigkeit entspricht der maximalen Geschwindigkeit, für die diese Bedingung noch erfüllt wird.

Im nächsten Szenario werden beide Fahrzeuge in eine Richtung abbiegen. Dabei wird folgende Ungleichung verwendet:

$$\frac{d_{A1} - R}{v_1} < \frac{d_{A2} - R + \frac{\pi R}{2} + \frac{l_2}{2} + \varepsilon}{v_2} \tag{8}$$

Tritt diese Bedingung ein, muss Fahrzeug, das später Abbiegepunkt erreicht, seine Geschwindigkeit verringern.

Bei der letzten Variante fahren die beiden Fahrzeuge weiter aufeinander zu, ohne die Richtung zu ändern. In diesem Fall besteht sofortiger Handlungsbedarf. Die Transportfahrzeuge können Ausweichmanöver durchführen. Es wird geprüft, ob während des Manövers Kollisionen mit statischen Objekten in der Umgebung ausgeschlossen sind. Die Zeit, die das erste Fahrzeug für das Manöver benötigt, wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_M = \frac{\pi(x_2 + \frac{w_1}{2} + \frac{w_2}{2} + \varepsilon)}{2v_1} \tag{9}$$

Fahren die Fahrzeuge entlang Y-Achse, soll x in der Gleichung durch y ersetzt werden.

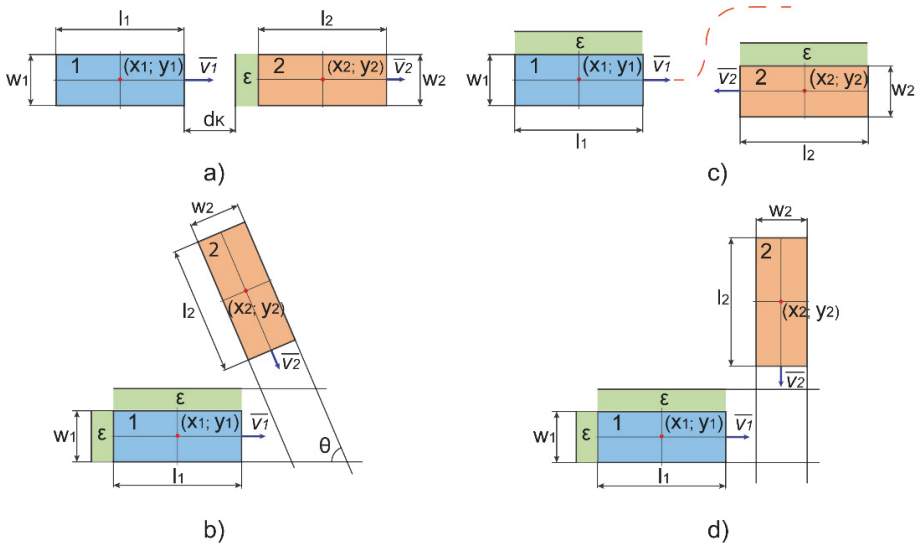


Abbildung 1: Kollisionsszenarien

In allen Szenarien wird der Zeitverlust durch Kollisionsvermeidungsmaßnahmen berechnet. Die dabei reduzierte Geschwindigkeit wird beim nächsten Ereignis, wenn

keine Gefahr mehr besteht, zurückgesetzt. Auf diese Weise werden Kollisionen dynamisch vermieden und dieses realitätsnahe Bewegungsverhalten der Fahrzeuge bei den klassischen Aufgaben des Ressourcenmanagements in DES berücksichtigt.

5 Implementierung

Python wurde als Programmiersprache für diesen Beitrag gewählt, da es sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie weit verbreitet ist (Tambad et al. 2020). Des Weiteren ermöglicht Python, Simulationsframeworks mit z.B. KI- und anderen Optimierungsalgorithmen nahtlos zu kombinieren (Lang et al. 2021). In Python gibt es zwei populäre Simulationsframeworks für DES und zwar SimPy (Matloff, 2008) und Salabim (van der Ham, 2018). SimPy und Salabim sind in ähnlicher Weise aufgebaut. Alle Komponenten sind als Python-Klassen implementiert. Die Interaktion zwischen den Komponenten und der Simulationssteuerung erfolgt über Prozessmethoden, die als Generatorfunktionen implementiert sind. In dieser Arbeit wird Salabim verwendet, da es über eine integrierte Animationsengine verfügt. Dies vereinfacht die Visualisierung von Simulationen und die Implementierung von Layouts erheblich.

Die Funktionalität der erstellten Komponente wurde in einer Simulationsumgebung mit manuell definierten Hindernissen und Trajektorien getestet (Abbildung 2). Die Experimente wurden mit zwei Fahrzeugen durchgeführt, die mit ihrer jeweiligen Höchstgeschwindigkeit auf vordefinierten Routen fahren. Für die Simulationsumgebung wurde ein Maßstab (1 m = 100 px) angenommen. Für jedes Kollisionsszenario wurden insgesamt 100 Simulationen mit 4 verschiedenen Werten (jeweils 20 Simulationen) für den Sicherheitsabstand ($\epsilon = \{0,1; 0,2; 0,3; 4\}$ m) durchgeführt. Alle Fahrzeugabmessungen wurden während der Versuche variiert ($w_i \pm 0,5$ m und $l_i \pm 0,5$ m) und jedes Mal zufällig zugewiesen. Unter diesen Bedingungen konnten die Kollisionen mit den vorgeschlagenen Berechnungsmethoden in allen simulierten Fällen erfolgreich vermieden werden. Unter "Kollision" wurde verstanden, dass die um die Sicherheitsabstände erweiterten Begrenzungsrahmen von Fahrzeugen überlappen. Das Video mit den Simulationen ist online unter dem Link <https://youtu.be/YfH5DGkaVzA> verfügbar.

6 Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag entwickelte Objektklasse ermöglicht das Hinzufügen von frei beweglichen Transportressourcen zu Open-Source DES-Bibliotheken. Es unterstützt ebenfalls die Modellierung kollisionsfreier Bewegungen. Das vorgeschlagene Klassendesign ist in allen objektorientierten Programmiersprachen anwendbar. Dadurch wird die Funktionalität bestehender Open-Source- und kommerzieller Softwarelösungen erweitert und der Zugang zu komplexen Materialflusssimulationen für KMUs und Forschungseinrichtungen verbessert. Obwohl der Fokus dieser Arbeit auf Intralogistikfahrzeugen liegt, sind die Ergebnisse auch auf andere Fahrzeuge übertragbar.

Basierend auf dem vorgeschlagenen Klassendesign wurde eine Komponente für ein intralogistisches Transportfahrzeug für die Python-Bibliothek Salabim entwickelt. Die Funktionalität der generierten Komponente wurde in der Simulationsumgebung mit zwei Fahrzeugen unter den oben genannten Bedingungen erfolgreich verifiziert.

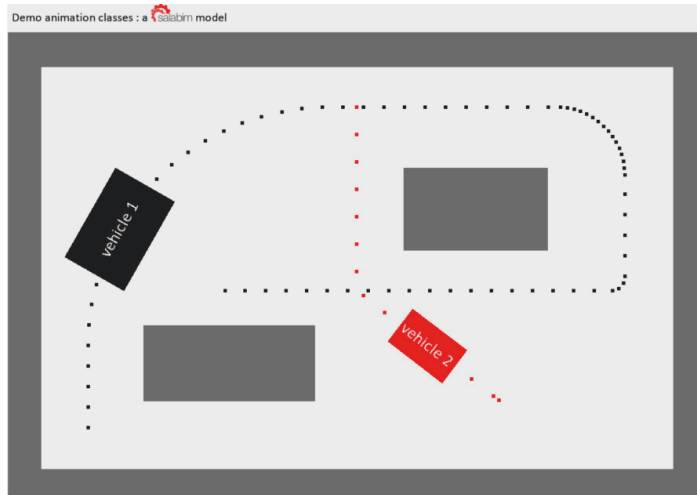


Abbildung 2: Simulationsumgebung

Der Programmieraufwand für die Verwendung der entwickelten Objektklasse ist geringer als bei einer Neuentwicklung. In der Regel bedarf es nur einer Anpassung der Attributwerte.

Es wurden auch Vergleiche mit der kommerziellen Softwarelösung Plant Simulation durchgeführt. In Plant Simulation gibt es beispielsweise keine vorprogrammierten Methoden zur Implementierung der Kollisionsvermeidung. Daher sind Anwender*innen dazu angehalten, diese Funktion mittels manuell erstelltem Programmcode zu realisieren. Dies impliziert, dass die kommerzielle Software in dieser Hinsicht keine Reduzierung des Programmieraufwandes bewirkt. Darüber hinaus nutzt "Plant Simulation" eine proprietäre Programmiersprache, welche nicht denselben Verbreitungsgrad wie Python hat. Der Zeitaufwand könnte folglich sogar erhöht sein, da für Python aufgrund der umfangreichen Python-Community vorgefertigte Code-Segmente für eine Vielzahl von Anwendungsfällen zugänglich sind.

Eine zusätzliche Evaluation der Komponente in komplexeren Szenarien, involvierend mehrere Fahrzeuge sowie zufällig generierte Hindernisse, ist jedoch erforderlich. Darüber hinaus steht eine detaillierte Gegenüberstellung mit den Funktionen kommerzieller Softwarelösungen noch aus. Dieses Vorhaben ist für künftige Untersuchungen geplant. Vor diesem Hintergrund sollte der vorliegende Beitrag als eine initiale Phase innerhalb des umfassenden Forschungsprojekts betrachtet werden.

Literatur

Alves, G.; Jürgen Roßmann; Roland Wischnewski: A Discrete-Event-Simulation Approach For Logistic Systems With Real Time Resource Routing And Vr Integration. International Journal of Computer and Information Engineering (2009), S. 821–826.

- Fransen, K.; van Eekelen, J.; Pogromsky, A.; Boon, M.; Adan, I.: A dynamic path planning approach for dense, large, grid-based automated guided vehicle systems. *Computers & Operations Research* 123 (2020), S. 105046.
- Herazo-Padilla, N.; Montoya-Torres, J.R.; Muñoz-Villamizar, A.; Isaza, S.N.; Polo, L.R.: Coupling ant colony optimization and discrete-event simulation to solve a stochastic location-routing problem. In: 2013 Winter Simulations Conference (WSC), Washington, DC, USA, 08.12.2013 - 11.12.2013, 2013, S. 3352–3362.
- Jiménez, F.; Naranjo, J.E.; García, F.: An Improved Method to Calculate the Time-to-Collision of Two Vehicles. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research* 11 (2013) 1, S. 34–42.
- Kousi, N.; Koukas, S.; Michalos, G.; Makris, S.: Scheduling of smart intra – factory material supply operations using mobile robots. *International Journal of Production Research* 57 (2019) 3, S. 801–814.
- Lang, S.; Reggelin, T.; Müller, M.; Nahhas, A.: Open-source discrete-event simulation software for applications in production and logistics: An alternative to commercial tools? *Procedia Computer Science* 180 (2021), S. 978–987.
- Matloff, N.: Introduction to discrete-event simulation and the simpy language. Davis, CA. Dept of Computer Science 2 (2008), S. 1–33.
- Müller, M.; Reggelin, T.; Kutsenko, I.; Zadek, H.; Reyes-Rubiano, L.S.: Towards Deadlock Handling with Machine Learning in a Simulation-Based Learning Environment. In: 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 11.12.2022-14.12.2022, 2022, S. 1485–1496.
- Peyman, M.; Copado, P.; Panadero, J.; Juan, A.A.; Dehghanimohammadabadi, M.: A Tutorial on how to Connect Python with Different Simulation Software to Develop Rich Simheuristics. In: 2021 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix, AZ, USA, 12.12.2021 - 15.12.2021, 2021, S. 1–12.
- Reith, K.-B.; Rank, S.; Schmidt, T.: A modular, discrete-event simulation framework for modelling free ranging transportation vehicles in intralogistics. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*, 15.09.2021-17.09.2021, 2021, S. 113–122.
- Sun, X.; Wu, C.-C.; Chen, L.-R.: An Automated Warehouse Sorting System for Small Manufacturing Enterprise Applying Discrete Event Simulation. In: 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 25.05.2018 - 27.05.2018, 2018, S. 1597–1601.
- Tako, A.A.; Robinson, S.: The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems* 52 (2012) 4, S. 802–815.
- Tambad, S.; Nandwani, R.; McIntosh, S.: Analyzing programming languages by community characteristics on Github and StackOverflow. arXiv preprint arXiv:2006.01351, 2020, zuletzt geprüft am 18.02.2022.
- van der Ham, R.: salabim: discrete event simulation and animation in Python. *Journal of Open Source Software* 3 (2018) 27, S. 767.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Integration eines SAP-Transportleitsystems in eine Simulationsumgebung zur Unterstützung von Entscheidungen im operativen Betrieb

Integration of an SAP Transport Control System in a Simulation Environment to Support Decisions in Operational Management

Stefan Galka, Florian Schmid, OTH Regensburg, Regensburg (Germany),
stefan.galka@oth-regensburg.de, florian.schmid@oth-regensburg.de

Dominik Grasser, Jonathan Hohm, Flexus AG, Würzburg (Germany),
d.grasser@flexus.net, j.hohm@flexus.net

Stephan Stauber, SimPlan AG, Regensburg (Germany), stephan.stauber@simplan.de

Sebastian Meißner, Fachhochschule Landshut, Landshut (Germany),
sebastian.meissner@haw-landshut.de

Abstract: Digital twins enable the digital representation of physical systems and provide comprehensive modelling and analysis capabilities. An online data exchange between the Digital twin and SAP is feasible, through integration of a transport control systems (SAP) via RESTful API. This interface allows decision making in resource allocation and furthermore the adaptation of the digital model if the real system changes. Despite the associated challenges in terms of data synchronisation, the integration has benefits such as a reduction in modelling effort and an increase in the lifetime of the digital twin. In the context of this work, the design of the interface between the simulation software and a SAP transport control system via RESTful API is described.

1 Simulationsbasierte Digitale Zwillinge für die Unterstützung von operativen Entscheidungen

Interne Transportsysteme sind ein wesentlicher Bestandteil von intralogistischen Systemen. Aufgrund der flexiblen Einsatzmöglichkeiten werden häufig Fahrzeugsysteme aus Flotten von Gabelstaplern, Routenzügen und Fahrerlosen Transportfahrzeugen eingesetzt. Diese Systeme sind durch einen hohen Grad an Komplexität gekennzeichnet, da es eine Vielzahl von Wechselwirkungen mit den vor- und nachgelagerten Systemen gibt und die Anforderungen sich schnell verändern. (Fottner et al. 2022)

Somit können die Auswirkungen von Entscheidungen, wie z.B. die eingesetzte Fahrzeuganzahl, von den Verantwortlichen nur schwer eingeschätzt werden. Simulationsbasierte Digitale Zwillinge können die Entscheidungsträger unterstützen, in dem Entscheidungen vorab mit Hilfe des Digitalen Zwillings untersucht werden. (Kauke et al. 2021) In diesem Beitrag beschreibt der Begriff Digitaler Zwilling ein virtuelles Abbild eines realen Systems, welches die Möglichkeit zur Simulation des Transportsystems bietet und bidirektional Daten mit Komponenten des realen Systems austauschen kann (vgl. Kuehner et al. 2021).

Im Kontext des Forschungsprojektes „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) wird ein Digitaler Zwilling für innerbetriebliche Transportsysteme entwickelt und getestet. Der Digitale Zwilling soll operative Entscheidungen unterstützen, beispielsweise die Ressourceneinsatzplanung oder die Einstellung von Entscheidungsparametern für ein Transportleitsystem (TLS). Eine Zielsetzung im Projekt ist die automatisierte Erstellung von Simulationsmodellen, die den aktuellen Systemzustand abbilden. Für eine automatisierte Modellgenerierung müssen Informationen zum aktuellen Wegenetz (Knoten und Kanten) und zum Prozess übertragen werden. Für die Abbildung des realen Systemverhaltens in der Simulation, ist das Entscheidungsverhalten der steuernden Instanz (TLS) zu synchronisieren. Um den Implementierungsaufwand zu reduzieren, soll das reale TLS auch die Entscheidungen innerhalb des virtuellen Systems (Simulation) treffen. Damit wird sichergestellt, dass Entscheidungen im realen und im virtuellen System nach denselben Regeln getroffen werden.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze zur automatischen Modellgenerierung (AMG) für die Simulation. Eine Klassifizierung der Vorgehensweise wird von Bergmann und Straßburger (2020) vorgestellt. Reinhardt et al. (2019) geben einen Überblick über die genutzte Datengrundlage und das eingesetzte Datenaustauschformat. In zahlreichen Veröffentlichungen wird AutomationML als Datenaustauschformat für Produktions- und Logistiksysteme vorgeschlagen. (Schroeder et al. 2016, Prior et al. 2023) Im Kontext der AMG wird immer häufiger das Thema Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) diskutiert, mit dem Ziel den Vorbereitungsaufwand für die VIBN zu reduzieren. (Prior et al. 2023) Die VIBN dient laut VDI 3693 zur Aufdeckung von Fehlern aus dem Engineering und findet vor der realen Nutzung des technischen Systems statt. Die Emulation ist dabei die funktionale Nachbildung des Systems durch ein Ersatzsystem. (VDI 3693) Das Ersatzsystem wird im Bereich der Intralogistik häufig mit Hilfe eines ereignisdiskreten Simulationsmodells umgesetzt. (Gutenschwager et al. 2000) Beispielsweise zeigen Kemper und Spiekermann (2010) den Status der Emulation von Logistiksystemen im SAP-Umfeld auf. Für die Kommunikation zwischen der Emulation und der getesteten Steuerung wird in Veröffentlichungen der OPC UA Standard für den Datenaustausch vorgeschlagen. (Grzona et al. 2019) Schmidl et al. (2021) demonstrieren, dass mit OPC UA auch der Datenaustausch zwischen verschiedenen IT-Systemen und Simulationsinstanzen möglich ist, was im Kontext von Co-Simulationen relevant ist. Im Kontext der Digitalen Zwillinge wird der Austausch von Daten zwischen betrieblichen Informationssystemen und dem vir-

tuellen Abbild wichtig. Koenig (2009) stellt dazu eine Möglichkeit vor, wie Lagerbestände aus dem SAP mit Hilfe von Remote Function Call (RFC) übertragen werden können. Die Übernahme von Fertigungsaufträgen mit Hilfe von RFC wird von Höpfe (2013) demonstriert. Die Möglichkeit zur Einbindung von Live-Daten in einen Digitalen Zwilling, für die Visualisierung von Informationen, stellt Selmaier et al. (2021) vor. Dabei wird eine Representational State Transfer Application Programming Interface (REST-API) eingesetzt.

Der vorliegende Beitrag greift bestehende Ansätze aus der Literatur auf und überträgt diese auf den im Kapitel 1 beschriebenen Anwendungsfall. Erstmals wird dabei die technische Umsetzung der Kommunikation zwischen einem Simulationsframework und dem ERP-System SAP über die Business Technology Platform (Cloudumgebung, BTP) beschrieben. Weiterhin wird dargestellt, wie Entscheidungssysteme aus betrieblichen IT-Systemen direkt in den Simulationsablauf eingebunden werden können und welche Auswirkungen dies auf die Laufzeit der Simulation hat.

3 Kommunikation zwischen SAP und Simulation

Die Kommunikation zwischen der Simulation und dem ERP-System SAP erfolgt über die Cloud Plattform (BTP). Auf der Plattform sind verschiedene Services verfügbar, unter anderem ein TLS-Adapter der Firma Flexus, der https-Anfragen verarbeiten kann. Um die Datensicherheit zu gewährleisten, muss jede Anfrage an das TLS über einen OAuth2-Token authentifiziert werden. Durch Nutzung von SAP Anmeldedaten (SAP Legacy User der BTP) und den Client-Informationen des SAP-Systems kann aus dem Simulationsframework ein verschlüsselter Token mit temporärer Gültigkeit über die BTP erzeugt werden. Dieser wird lokal gespeichert und muss bei jeder Anfrage im Request-Header als Authentifizierung übergeben werden.

Anfragen, die aus der Simulation an den TLS-Adapter übergeben werden, werden über einen Cloud-Connector an das SAP-ERP System weitergeleitet. Entsprechend der Art der Anfrage erfolgt eine Bearbeitung im TLS-Core. Die hierfür benötigten Informationen aus der Simulationsumgebung sind in der Anfrage enthalten. Dazu wird für jede Anfrageart ein JavaScript Object Notation (JSON) definiert, welches im Request-Body der Anfrage übergeben wird. Gleiches trifft auch auf die Informationen zu, die aus dem TLS an die Simulation übermittelt werden. Der Aufbau und die Kommunikationswege sind in der Abbildung 1 dargestellt.

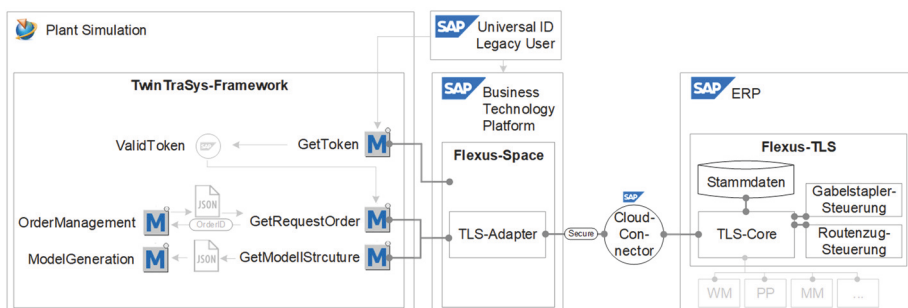


Abbildung 1: Darstellung der Kommunikation zwischen Simulation und TLS

Für die Kommunikation mit dem SAP wird im TwinTraSys-Framework (mit der Simulationssoftware „Plant Simulation“) ein eignes Netzwerk erstellt, welches die relevanten Informationen und Methoden für die Kommunikation zusammenfasst. Im Algorithmus 1 wird der vereinfachte Inhalt der Methode für einen PostRequest an den TLS-Adapter aufgezeigt. Zuerst wird das JSON-Objekt für den Header erzeugt (*reqHeader*). Dieser enthält alle notwendigen Informationen für die Authentifizierung. Zusätzlich wird ein weiteres JSON-Objekt als Request-Body erstellt, in dem die relevanten Informationen aus dem Simulationsmodell (bspw. die aktuell offenen Aufträge, *Reqbody*) für die Funktionsausführung im TLS aufbereitet werden. Für die Rückmeldung des TLS werden zwei zusätzliche JSON-Objekte definiert (*respheader*, *respbody*). Auf den Inhalt der JSON-Objekte und die Verarbeitung der Daten wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

Algorithmus 1: Auszug aus einer Methode für den PostRequest (SimTalk)

```
//Generierung Header
var reqHeader : json
reqHeader.getOrCreateJson("Authorization")
reqHeader["Authorization"] := ...
//Generierung Body
var strjs : string := Js_Request.asstring
var Reqbody : json
reqbody.parse(strjs)
//PostRequest an TLS-Adapter
var respheader : json
var respbody : json
httpPostRequest(Url, reqbody, reqheader, respheader, respbody)
//Verarbeitung des Response
...
```

Eine wichtige Anforderung bei der Gestaltung der Schnittstelle zwischen Simulation und SAP war, dass gleichzeitig mehrere Instanzen des Simulationsframeworks mit dem gleichen SAP-System kommunizieren können. Dies ist der Fall, wenn parallel mehrere Experimente durchgeführt werden sollen.

4 Generierung ablauffähiger Simulationsmodelle mithilfe von SAP-Stammdaten

Moderne Transportleitsysteme (TLS) verfügen über umfangreiche Stammdaten, mit denen das innerbetriebliche Transportsystem beschrieben wird. Dies ist notwendig, da das TLS bei der Auftragszuweisung bspw. das Wegenetz und die Einsatzbereiche von Flurförderzeugen berücksichtigen muss. Diese Stammdaten können für die Generierung von ablauffähigen Simulationsmodellen genutzt werden. Damit kann der Aufwand bei der Erstellung der Modelle reduziert sowie das Modell bei Veränderungen im realen System angepasst werden, was bei Digitalen Zwillingen unerlässlich ist. Der Ablauf der automatischen Modellgenerierung orientiert sich an dem von Bergmann und Straßburger (2020) vorgestellten internen Ansatz, bei dem die Algorithmen für die Generierung im Simulationsframework enthalten sind.

Das TLS der Firma Flexus bietet ein graphisches User Interface (*RouteOptimizer*) an, mit der das innerbetriebliche Transportsystem beschrieben werden kann (siehe Abbildung 3, links). Dabei wird das Wegenetz mit Hilfe von Knoten und Kanten definiert. Knoten können Verzweigungspunkte (Kreuzungen) oder Funktionsbereiche (Bereitstellungsfläche, Verladerrampen) sein. Zu jedem Knoten können Informationen hinterlegt werden, dies kann z.B. die Bezeichnung eines Produktversorgungsbereiches sein, mit dem ein Transportauftrag aus dem SAP diesem Knoten zugeordnet werden kann („positions“). Die Knoten werden im RouteOptimizer mit Wegen verbunden. Auch diese Wege können mit Informationen angereichert werden. Beispielsweise kann definiert werden, ob der Weg in beide Richtungen befahren werden kann („directed“) und welche Transportressourcen („vehicleTypes“) den Weg befahren dürfen. Aus diesen Informationen wird ein JSON-Objekt erstellt, welches sich inhaltlich in die Bereiche Knoten („nodes“), Kanten („edges“) und Fahrzeugtypen („vehicleTypes“) untergliedern lässt. Exemplarisch ist in der Abbildung 2 ein Auszug dargestellt.

```

"message": {      }, //Allgemeine Informationen
"area": {        //Es kann mehrere Bereiche geben (bspw. Stockwerke, Hallen)
  "nodes": [
    { "id": 1,           //ID des Knoten im TLS
      "x": 238,         //X-Position im Area-Koordinatensystem
      "y": 595,         //Y-Position im Area-Koordinatensystem
      "positions": [{}], //Angaben zum Lagerplatz bei dem ein Knoten befindet
      "externalNodes": [{}], ... //Angaben zu Verbindungen zu anderen Areas
    }
  ],
  "edges": [
    { "sourceNode": 1,   //Start-Knoten für den Weg
      "destinationNode": 30, //Ziel-Knoten für den Weg
      "vehicleTypes": [...], //Fahrzeugtypen die den Weg befahren dürfen
      "directed": false, //zulässige Fahrtrichtung des Wegs
      "blocked": false }, ... //Wegabschnitt aktuell gesperrt
    }
  ],
  "vehicleTypes": [
    { "area": "",           //Einsatzbereich des Fahrzeuges
      "vehicletype": "RTZ-A", //Bezeichnung des Fahrzeugtyps
      "speed": 3.5,         //Geschwindigkeit des Fahrzeugtyps
      "maximumWeight": 300, //max. Gewicht einer Transporteinheit
      "vehicles": [{"vehicle": "RTZ1-A", ...} ] , ... } // Instanzen des Typs
    }
  ]

```

Abbildung 2: Auszug aus dem JSON-Objekt für die Modellgenerierung

Nach dem das JSON-Objekt an die Simulation übermittelt wurde, werden die Informationen für die Modellgenerierung aufbereitet. Dies umfasst eine Konsistenzprüfung der Daten und eine Aufteilung dieser auf verschiedene Tabellen. Das Simulationsframework umfasst verschiedene generische Bausteine mit denen innerbetriebliche Transportsysteme abgebildet werden können. Essenziell sind dabei Wegabschnitte, Kreuzungen und Übergabepunkte. Im ersten Schritt werden die Knoten entsprechend der Koordinaten erzeugt. Als nächstes werden die Kanten positioniert und mit den Knoten verbunden. Die Länge eines Wegeabschnittes wird dabei aus den Koordinaten der Start- und Endknoten berechnet. Bei der Erzeugung der Objekte in der Simulation erfolgt eine Parametrierung der Bausteine, so wird zum Beispiel die maximal zulässige Geschwindigkeit auf einem Wegstück in den Eigenschaften des Objektes „Weg“ gespeichert. Im letzten Schritt der Modellgenerierung werden die Transportressourcen auf Grundlage der Fahrzeugtypen erzeugt und soweit nicht anders spezifiziert zufällig

im Wegenetz platziert. Der Ablauf der Modellgenerierung ist in der Abbildung 3 graphisch dargestellt.

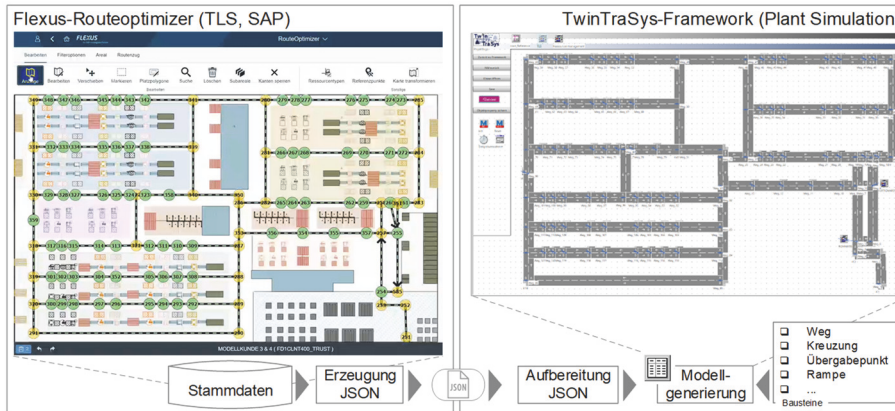


Abbildung 3: Ablauf der automatischen Modellgenerierung

5 Integration eines Transportleitsystems als Entscheidungsinstanz innerhalb der Simulation

Die elementare Funktion eines Transportleitsystems (TLS) ist die zielorientierte Zuweisung von Transportaufträgen für die einzelnen Transportressourcen. Dabei können Zielsetzungen wie die Reduzierung der Fahrstrecke, der Auftragsdurchlaufzeiten und des Leerfahrtanteils verfolgt werden. Für die Entscheidungsfindung beurteilt das TLS die im aktuellen Systemzustand verfügbaren Transportaufträge mit Hilfe einer Zielfunktion, die projektspezifische Gewichtungen der einzelnen Ziele berücksichtigt.

Für die realitätsnahe Abbildung des Systemverhaltens im Simulationsframework muss die Entscheidungslogik des TLS in der Simulation implementiert oder das TLS in den Simulationsablauf einbezogen werden. Um die Synchronisation zwischen realem und virtuellem System zu unterstützen, wird die Einbindung des SAP-TLS in den Simulationsablauf umgesetzt.

```
"singleOrderOptions": {
  "orders": [ //Menge der offenen Aufträge mit folgenden Informationen
    {"orderId": "0000100921 ",
     "nodes":[
       {"nodeId": "AP3-3",
        "sequenceId": 0,
        "released": true,
        "nodePosition": {"x":10,"y":20}}, ... ]
      "createdAt": "2023-03-30T11:40:03.12Z"},...],
  "vehicles":[ //Liste an einsetzbaren Fahrzeugen
    {"vehicleName": " RTZ1-A",
     "nodeId": "12"},...],
  "prioritySettings": //List mit experimentspezifischen Parametern
    {"distance":[
      {"upToMeters": 50,
       "value": 100},...],
     "time": [...],...}
```

Abbildung 4: Auszug aus dem JSON-Objekt für die Auftragszuweisung

Im vorgestellten Ansatz werden alle Transportaufträge in der Simulation verwaltet, damit das SAP-System gleichzeitig von mehreren parallellaufenden Simulationen genutzt werden kann. Weiterhin sind alle experimentspezifischen Parameter, die das TLS betreffen, auch in der entsprechenden Instanz der Simulation gespeichert. Dies sind bspw. Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion, da sich diese in den Experimenten unterscheiden können.

Ausgangspunkt ist der Abschluss eines Transportauftrages durch eine Transportressource. In diesem Fall ruft die Transportressource den Auftragsmanager in der Simulation auf. Die Transportauftragssteuerung erstellt eine Liste mit aktuell verfügbaren Transportaufträgen für die entsprechende Transportressource. Durch die Aufbereitung der Aufträge kann die Datenmenge, die zwischen Simulation und SAP ausgetauscht wird, reduziert werden. Anschließend wird ein JSON-Objekt erstellt, welches die aufbereiteten Transportaufträge („*orders*“), Angaben zu den aktuell verfügbaren Fahrzeugen („*vehicles*“) und die experimentspezifischen TLS-Parameter („*prioritySettings*“) enthält. Die Struktur des JSON orientiert sich hierbei an der in der VDA5050 (2022) beschriebenen Auftragsstruktur für die Kommunikation zwischen FTF und der Leitsteuerung. Das entsprechende JSON-Objekt ist in Auszügen in der Abbildung 4 dargestellt.

Die übermittelten Daten werden im TLS-Core (SAP) aufbereitet und an die Funktionen für die Auftragszuweisung übergeben. Bei der Implementierung dieser Funktionen im SAP ist eine Trennung der logischen Funktionen (Auswahl des nächsten Auftrages) und der Datenverarbeitung (Eintragungen in die SAP-Datenbank) notwendig. Damit wird vermieden, dass ein Aufruf des TLS aus der Simulation zu einer Veränderung von Daten im realen System führt. Das Ergebnis der Auftragszuweisung wird in ein JSON-Objekt überführt und an die Simulation übergeben. In der Simulation wird der Auftrag an die entsprechende Transportressource weitergegeben und die Daten in der Transportauftragstabelle werden aktualisiert. Der schematische Ablauf ist in der Abbildung 5 visualisiert.

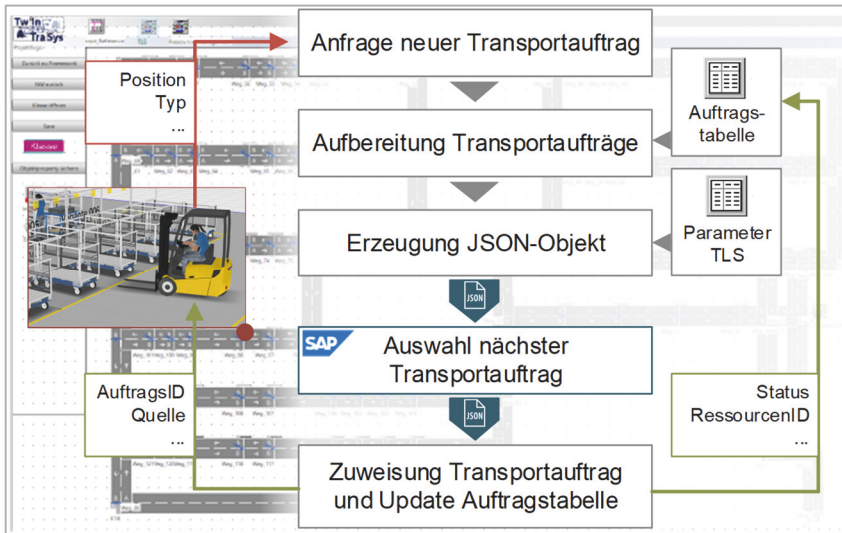


Abbildung 5: Ablauf bei der Zuweisung von Transportaufträgen durch das SAP-TLS

Falls in dem innerbetrieblichen Transportsystem Routenzüge zum Einsatz kommen, wird die Tourenbildung (Zusammenfassen von Aufträgen zu einer Fahrt des Routenzuges) durch das TLS übernommen. In diesem Fall können auch mehrere Transportaufträge an eine Ressource übermittelt werden. Gleiches ist auch möglich, wenn die Transportkapazität des Gabelstaplers größer als eine Transporteinheit ist.

Für den dargestellten Anwendungsfall ist es wichtig, dass die Laufzeit der Simulation in einem akzeptablen Rahmen liegt, da für die Absicherung von Entscheidungen mehrere Experimente und Replikationen durchgeführt werden müssen. Während die Modellgenerierung nur ausgeführt wird, wenn sich Änderungen im System ergeben haben, erfolgt die Zuweisung der Transportaufträge deutlich häufiger (>1.000 Zuweisungen pro simulierten Tag). Im Rahmen eines Massentests, bei dem innerhalb eines kurzen Zeitraums viele Anfragen an das SAP-TLS übertragen wurden, wurde die Laufzeit des Simulationsmodells untersucht. Bei dieser Untersuchung wurde die Anzahl, der an das TLS, übergebenen Transportaufträge variiert, damit der Einfluss dieses Kriteriums berücksichtigt werden kann. Hierfür wurde die Simulation solange angehalten wird bis das TLS den nächsten Transportauftrag zurückgeliefert hat. Die Ergebnisse des Tests sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Laufzeiten in Abhängigkeit der Anfragengröße

Anzahl Aufträge pro Request	Zeit pro Request	Laufzeit der Simulation bei 1.000 Request
1	0,059 s	1,04 min
3	0,184 s	3,13 min
5	0,300 s	5,05 min
8	0,445 s	7,50 min
10	0,550 s	9,28 min
13	0,692 s	11,63 min
15	0,793 s	13,42 min

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zeit für die Kommunikation und Entscheidungsfindung im TLS bei einer Erhöhung der Anzahl an möglichen Aufträgen (Auftragsaufbereitung in der Simulation), die an das TLS übergeben wird, linear steigt. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass eine gezielte Auswahl an Transportaufträgen sich positiv auf die Laufzeit der Simulation auswirkt. Dabei ist sicherzustellen, dass das Systemverhalten nicht beeinflusst wird, respektiv die Entscheidung des TLS verändert wird.

6 Herausforderungen bei der Integration eines realen Transportleitsystems

Die Integration eines realen Transportleitsystems (TLS) in eine Simulationsumgebung hat den Vorteil, dass dessen Entscheidungslogik nicht in der Simulation nachgebildet werden muss. Weiterhin ziehen Anpassungen im TLS keine Änderungen in der Simulation nach sich, was die Nutzbarkeit und Aktualität des Modells verbessert. Die Umsetzung im Forschungsprojekt TwinTraSys hat aufgezeigt, dass die Integration Herausforderungen mit sich bringt.

Im SAP werden unternehmensrelevante Informationen gespeichert und verarbeitet. Diese Informationen müssen vor Fremdzugriff und ungewollter Modifikation geschützt werden. Aus diesem Grund muss die Kommunikation zwischen SAP und Simulation die Anforderungen an die Datensicherheit erfüllen. Damit geht auch die Forderung einher, dass Simulationsereignisse nicht die Daten im operativ genutzten SAP-System verändern dürfen. Unter Berücksichtigung der Anforderung, dass gleichzeitig mehrere Simulationsmodelle mit dem gleichen SAP-System kommunizieren müssen, führt dies zu der Notwendigkeit, dass die Datenspeicherung im Simulationsframework (Modell oder Datenbank) erfolgen muss. Dies hat zur Folge, dass die Datenmenge, die bei einer Anfrage an das TLS übermittelt werden muss, zunimmt. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine klare Trennung der Funktionen im SAP sinnvoll ist. Häufig sind die Entscheidungslogiken eng mit der Ausführung von Transaktionen auf der SAP-Datenbank verbunden. Ohne diese Trennung besteht die Gefahr, dass Inkonsistenzen entstehen und das reale System beeinträchtigt wird.

Im realen Einsatz ist die Frequenz für Anfragen an das TLS gering, da die Transportressourcen die Aufträge zuerst ausführen müssen, bevor eine neue Anfrage gestellt wird. Die Frequenz erhöht sich deutlich, wenn die Anfragen durch eine oder mehrere

Simulationsinstanzen generiert werden. In diesem Fall muss das Lastmanagement des SAP-Servers beachtet werden, damit der Digitale Zwilling nicht das reale System ausbremst.

Es ist anzumerken, dass durch die Funktionen für die Kommunikation mit einem http[s]-Server von Plant Simulation eine Anbindung der Simulation mit dem BTP gut umsetzbar ist. Hierbei gestaltet sich jedoch die Aufbereitung und Erstellung von komplexeren JSON-strukturen für die Anfragen vergleichsweise aufwändig.

Wie sich im Massentest gezeigt hat, treten lange Simulationslaufzeiten durch die Kommunikation mit dem Transportleitsystem auf. In Hinblick auf die Menge an Experimenten, die im Forschungsprojekt TwInTraSys durchgeführt werden, soll daher im weiteren Projektverlauf die Schnittstelle hinsichtlich der Laufzeit optimiert werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) durchgeführt. Das Projekt wird durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Verbundförderprogramms – Förderlinie Digitalisierung Förderbereich Informations- und Kommunikationstechnik gefördert (Förderkennzeichen DIK-2104-0062).

Literaturverzeichnis

- Bergmann, S.; Straßburger, S.: Automatische Modellgenerierung – Stand, Klassifizierung und ein Anwendungsbeispiel. In: Mayer, G.; Pöge, C.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Springer Berlin Heidelberg 2020, S. 333–347.
- Fottner, J., Galka, S., Habenicht, S., Klenk, E., Meinhardt, I., Schmidt, T. Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen. Springer, Berlin, Heidelberg 2022.
- Grzona, P., Knüpfer, P., Hörmann, R., Wilsky, P., Horler, S. Anwendungsorientierte Simulationsbausteine für die schlanke virtuelle Inbetriebnahme verketteter Produktionssysteme. Putz, M, Schlegel, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2019. Auerbach, 2019, S. 562-569.
- Gutenschwager, K., Fauth, K., Spieckermann, S., Voß, S. Qualitätssicherung lagerlogistischer Steuerungssoftware durch Simulation. Informatik-Spektrum 23, 2000, S. 26-37.
- Höppe, N., Seeaner, F., Spieckermann, S. Simulationsgestützte Feinplanung im Produktionsumfeld - vom SAP zur SPS. In Dangelmaier, W., Laroque, C., Klaas, A. (Hrsg.) Simulation in Produktion und Logistik Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung, Paderborn, 2013, S. 669-678.
- Kauke, D., Galka, S., Fottner, J. Digital Twins in Order Picking Systems for Operational Decision Support. In 54th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001, S. 1655–1664.
- Kemper, J., Spieckermann, S. Emulation von Logistik-Steuerungen in SAP-Umgebungen. In Zülch, G., Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 2010, S 583-590.

- Koenig, J. Das Virtual Engineering Interface: VEI 4 SAP - Die Kopplung von SAP und Plant Simulation. https://media1.autohaus.de/fm/3576/Snapshots_SAP_Simulation_Schnittstelle.pdf, 2009, letzter Zugriff 15.05.2023.
- Kuehner, K.J., Scheer, R., Straßburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review, IN: Mourtzis, D. (Hrsg.): *Procedia CIRP*, Volume 104, 2021, S. 1227-1232.
- Prior, J., Karch, S., Strahilov, A., Kuhlenkötter, B., Lüder, A. Template-Based Production Modules in Plant Engineering. In Liewald, M., Verl, A., Bauernhansl, T., Möhring, HC. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology..* Springer, Cham, 2023, S. 652-663.
- Reinhardt, H., Weber, M., Putz, M. A Survey on Automatic Model Generation for Material Flow Simulation in Discrete Manufacturing. *Procedia CIRP*. Volume 81, 2019, S 121-126.
- Schmidl, E., Wenk, M., Russwurm, E., Franke, J. Interoperabilität realer und simulierter Produktionssysteme mittels OPC UA. In Franke, J. Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021, S. 496-504.
- Schroeder, G.N., Steinmetz, C., Pereira, C.E., Espindola, D.B. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 2016, S.12-17.
- Selmaier, A., Sjarov, M., Herbert, M., Franke, J., Distler, J., Fürst, J. Der Digitale Zwilling als echtzeitnahes Fertigungsabbild. In Franke, J. Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021, S. 496-504.
- VDA 5050. Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. Version 2.0, 2022.
- VDI/VDE 3693. Virtuelle Inbetriebnahme Modellarten und Glossar. Beuth, Berlin.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulation-based Analysis of a Value Stream as a Contribution to Sustainable Production and Logistics Systems of SMEs

Simulationsgestützte Analyse eines Wertstroms als Beitrag zu nachhaltigen Produktions- und Logistiksystemen von KMUs

Maximilian Kiefer, Jonas Maaßen

TU Dortmund University / Institute of Transport Logistics, Dortmund (Germany),
maximilian.kiefer@tu-dortmund.de, jonas.maaßen@tu-dortmund.de

Tobias Klima, Markus Rabe

TU Dortmund University / IT in Production and Logistics, Dortmund (Germany),
tobias.klima@tu-dortmund.de, markus.rabe@tu-dortmund.de

Abstract: In crises, small and medium-sized enterprises (SMEs) are under more significant pressure than large companies. However, SMEs are more adaptable to changes caused by external influences. To leverage this strength, the focus is on increasing transparency, identifying bottlenecks in the material flow, and evaluating a defined target state of the material flow based on company-specific key performance indicators (KPIs) for sustainable production. Varieties of different methods are suitable for determining these KPIs. In this paper, a simulation-based analysis is performed to determine such indicators. For this purpose, an application example from practice illustrates these methods' applicability to increase the SMEs' adaptability to external influencing factors. First, a value stream analysis of the current state of the material flow is performed. Based on the results, suggestions for changes are given and implemented in a new optimized value stream. A simulation study compares the new value stream with the current one.

1 Introduction

For production, manufacturing in large quantities is very economical. However, the shortening of product life cycles, the demand for more-innovative product concepts, growing product diversity, intensified competition, and changes in behavior in the socio-political environment require a faster response to these change processes and make large-scale production almost impossible (Appenzeller 2021). Especially for SMEs, these demands for high flexibility and quick reactions to new circumstances represent a significant challenge. Current crises such as the Corona pandemic or the

war in Ukraine make this particularly clear (Miklian and Hoelscher 2022). This results in challenges like uncertain supply chains and rising raw material prices. The pressure generated by external circumstances is intensified by corporate issues such as low transparency (Becker et al. 2017; Eggers 2020).

Eggers (2020) describes how SMEs can deal with crises optimally. The most significant difference between large enterprises and SMEs in times of crisis is that SMEs can react more flexibly to opportunities or threats (Eggers 2020). To improve the SMEs' flexibility, this paper focuses on increasing transparency, identifying weaknesses and bottlenecks, and evaluating the target state of the material flow using the combination of value stream analysis and simulation.

For this purpose, the research findings around the combination of simulation and value stream analysis are presented in Section 2. Subsequently, the use case is illustrated, and a product group is selected for the demonstration in Section 3. Section 4 describes the conceptual approach, and the combination of the two methods before the value stream analysis (VSA) is performed (Section 5). Based on the analysis findings, a value stream design (VSD) is developed in Section 6. In Section 7, a simulation study is conducted that compares both scenarios. Finally, Section 8 summarizes the results obtained and provides an outlook.

2 Related Work

Sohny (2022), Kaiser (2021), and Urnauer and Metternich (2019) show that the combination of the value stream method and simulation is suitable to support both methods. For example, the value stream analysis complements the simulation study's data procurement and system analysis (Kaiser 2021; Urnauer and Metternich 2019). Especially in the manufacturing industry, numerous literature reviews point this out (Romero and Arce 2017; Hartini et al. 2017; Suhadak et al. 2015). Exemplarily, Suhadak et al. (2015) examined various layout variants through simulation and value stream analysis of an SME operating in the food industry. However, 90 % of the articles deal with the company's manufacturing area, and a large part shows the application based on a case study in which lead time reduction is often considered the most important performance indicator (Romero and Arce 2017).

Nevertheless, SMEs still rarely use these methods despite their great potential (Dingli et al. 2021). Wiese (2016) highlighted that around 85 % of the SMEs did not previously utilize simulation experiments because of short-term costs and barriers by initial resources. This is also the case in the cold-forming sector. In addition, for SMEs in this sector, retooling of the production area due to old machinery, takes an exceptionally long time, and larger investments are often impossible. To demonstrate this potential for small and medium-sized enterprises in the cold-forming sector, an application example is necessary because all identified use cases differ from the objective mentioned and do not take into account the specifications of cold-forming SMEs.

3 Objects of Consideration

An application partner is identified for this purpose. The partner is a traditional German company that is active in the field of cold forming and high-precision turning. The company's customers demand high flexibility and responsiveness to short-term

order changes. At the same time, transparency and information flow deficits make planning and controlling for the company difficult. However, the company's organizational form as an order-related production with the push principle leads to overproduction and high inventories. This results in a lead time of over 130 days with a total production time of less than one day. Daily changes in customer orders lead to strong fluctuations in demand, which are further increased by the lot-push principle and a lack of production leveling. Therefore, the company's flexibility must be increased.

Before an analysis of the value stream can be realized in combination with simulation, a suitable product must be identified. Therefore, it is necessary to select a relevant group of products. Following the selection of the product group, a product that is particularly relevant for this group must be determined, which is suitable to carry out a representative value stream analysis.

The cold forging production program was selected for this study together with the company. The object of consideration is a part of the chassis and steering group, which represents a suspension and connection component and contributes to driving safety. Although the corresponding product family has a comparatively low share of sales, a reasonable potential for improvement is expected due to the more-complex production and the higher number of defects.

After choosing the group, it is essential to identify a group representative. For this purpose, the ABC analysis with sales value is suitable. First, the segments must be defined: The A articles comprise 70 % of the sales, B articles 25 %, and C articles 5 % (Ford Dickie 1951). Notably, Articles 1, 2, 3, and 4 are responsible for most of the sales. Figure 1 shows the result of the accomplished ABC analysis.

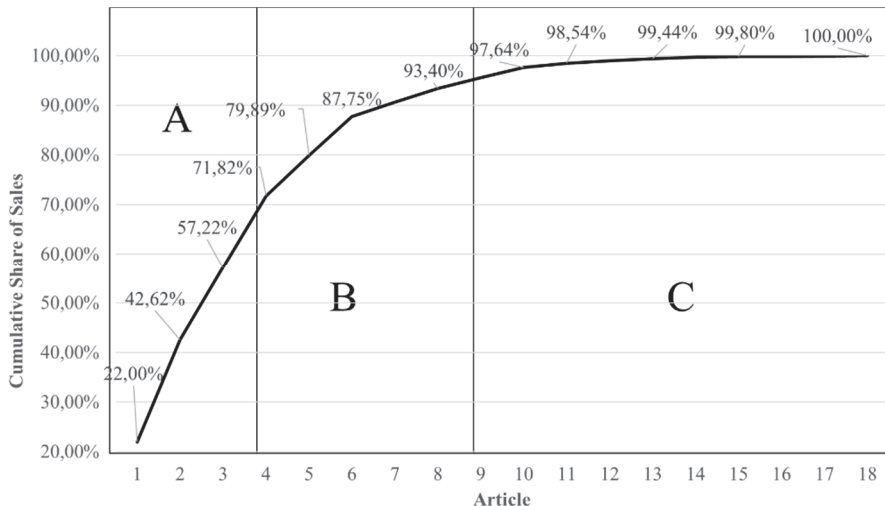


Figure 1: ABC-Analysis of the group of products

However, the company points out that Articles 1 and 2 are irrelevant, because these parts are run-out products. For illustration purposes, sales trends were evaluated. These show that the sales of Articles 5 and 6 have converged to the A products in the

last four years and that the trend for Articles 3 and 4 is declining. In contrast, sales for Articles 5 and 6 have risen continuously in the recent years and further sales growth is expected. Hence, Articles 5 and 6 are suitable as representatives for the part family, and the current state is analyzed accordingly.

4 Methodology

The initial situation in this case study shows a non-transparent value stream, leading to an unsuitable data-based value stream analysis. First, transparency must be created to identify unnecessary waste in the flow of materials and information. Kaiser (2021) presents in his study three benchmarks on the classic value stream method by Erlach (2020), Rother et al. (2018), and Klevers (2009). In this paper, the method of Rother et al. (2018) is used for identifying waste and bottlenecks and developing a new value stream.

The value stream has to be compared with the current situation. Simulation is a suitable tool for this purpose. In particular, discrete event simulation is an efficient method as it illustrates the interdependencies of individual logistics processes and enables comparability of scenarios (Clausen et al. 2013). The process model from VDI Guideline 3633 Part 1 is used, since it has considerable relevance in production and logistics in the German-speaking area (Rabe et al. 2008; VDI 2014).

Based on the results of the investigations using the methods identified, recommendations for action are made. These recommendations specify the necessary measures and strategies to eliminate the identified weaknesses and bottlenecks and to implement a more flexible value stream. To make it more comprehensible, the schematic procedure is shown in Figure 2.

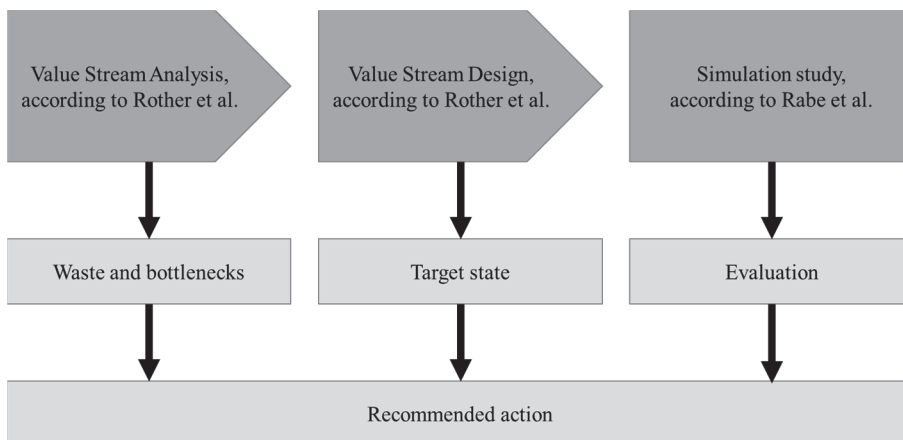


Figure 2: Schematic procedure of the study

5 Value Stream Analysis

As explained in Section 3, the value stream analysis relates to Articles 5 and 6 of the company due to increasing sales. The value stream mapping was carried out according

to the specifications of Rother et al. (2018), where uniform symbols and a language were used to create a shared understanding (Bertagnolli 2018). With this language, the value stream and the information flow from the external customer via the production processes to the suppliers were mapped. To determine the current state of the value stream, electronic data processing (EDP) evaluations, expert surveys, and own recorded and estimated values were collected and processed.

Gottmann (2016) was used as a guideline for determining the most important key figures. Thus, the target key figures, flow rate, and responsiveness were determined using the customer requirements. These include the key figures for Overall Equipment Effectiveness (OEE), Every Part of Every Interval (EPEI), the range of how long stock can cover the daily demand, the replenishment time, and the batch size.

All production steps were integrated into the value stream, and the corresponding key performance indicators were added. These cover everything from the entry of the starting material in the form of the supply of the material through the production processes to the shipping department.

Next, all waste has been identified and marked. High inventories, a lack of feedback and key figures, inefficient transports, long setup times, and the push system represent the primary waste in the production process. The high inventories are responsible for a long lead time of 137 days. In addition, high inventories hide the actual reasons for failure-prone processes, the production of defective goods, and other waste. Furthermore, some materials are stored in a block storage, which causes unnecessary restacking.

The lack of feedback and key figures makes the production process intransparent and challenging to measure. The machine operators are, at the same time, logistics employees in the role of material suppliers and transport the materials with forklifts to the next production step. In some cases, the machine operator also collects the materials himself, as there is no buffer near the machine. High setup times slow down the responsiveness to the consumption of subsequent processes.

Furthermore, the push system ignores the actual requirements of the downstream process and induces overproduction, because scheduled materials are not needed at this time. Moreover, machines and employees are unnecessarily employed. Another disadvantage of overproduction is the hiding of failures and unnecessary capital commitment. The already produced and defective parts remain hidden in inventory until their malfunctions are discovered in the downstream process. Short-term changes in the production sequence, fluctuating and short-term changes in demand quantities, fluctuating lead times, and the "replenishment routine" are wastes in the information flow.

While fluctuating and short-term changes in demand quantities cause short-term changes in production orders and fluctuating lead times, the major cause is the push system and the lack of leveling. The "replenishment routine" is closely linked to the bonus system and reports incorrect information back to the system to be able to pay the employees the appropriate bonus. In addition to the waste, the calculated OEE and cycle times provide first indications of the bottleneck machines.

6 Value Stream Design

Based on this VSA, a VSD has been developed according to Rother et al. (2018). Exemplary, two of their seven key questions are answered below.

Key question 1: *What is the cycle time on the pacing process for this product family?*

The pacing process for the articles was identified. Only bottleneck machines were considered, as these set the pace. Since the cycle times of these machines are similar, the machine with the lowest output is selected. Thus, the cycle time on the pacemaker process for this product family is defined.

Key question 2: *Where can you use continuous flow production?*

Due to the spatial separation and arrangement of workshop production, continuous flow production is unsuitable. In addition, some machines cannot process individual work pieces one after the other. Consequently, controlling the production in batch mode through pull systems is adequate.

Based on the guidelines and key questions, a value stream design has been developed together with the employees. The generated value stream design focuses on a pull process with Kanban-controlled supermarkets as buffers. However, this focus is difficult for SMEs, since short setup times are almost impossible due to the old machinery. Furthermore, supermarket buffering can only be reasonably implemented with transparency due to the complexity of the variety of variants. Finally, solutions are necessary to make the material flow transparent without completely changing the production logic that has grown over decades. Simultaneously, setup times for existing machines should be shorted without purchasing a new machine. Nevertheless, the changes developed can have a positive influence on the processes. For example, a one-time process transparency was created for all participants. In addition, optimization potentials were identified and subsequently implemented. An example in this context is the increased performance of the pacemaker process, which was realized through a workshop in cooperation with employees. Further investigation by a simulation study is required before implementing the target process.

7 Simulation

Following the investigations carried out concerning the value stream, the planned changes and measures from the value stream design have to be compared with the current state from the value stream analysis with the help of simulation methodology.

A simulation model has been designed using the simulation software AnyLogic 8.8 according to the described procedure of Rabe et al. (2008). The goal was described and the task defined. The task specification was created with the help of the concept model and the prepared data. Based on this, an executable simulation model has been developed. Finally, the two simulation experiments were executed.

A detailed goal definition, including the task specification, was established. Key figures were defined to be used to evaluate the scenarios. These include throughput, inventory, cycle time, occupied buffer locations, machine utilization, and distances traveled by the forklifts for a period of one production month. All data required for the simulation have been obtained and prepared. Three data types are necessary to model a production system (VDI 2014): technical, organizational, and system data. Technical data contain information concerning the structure of the production building, for example, the layout, equipment, or capacities of storage facilities. Organizational data include the process structures like employees' shift schedules or the allocation of the resources used for the tasks. Finally, the system data, including the production orders, were prepared for simulation.

A conceptual model has been created afterward. Here, the system limits are the warehouse for the raw materials and the product shipment. In addition, the material flow for full and empty containers and waste is shown. A load carrier change occurs at some production steps, e.g., from internal containers to customer containers. Only specific forklifts are available for each production step with its own buffer.

Following the creation of the conceptual model for the entire production process, the entire process was divided into individual processes. These separate processes have been represented as event-driven process chains, which subsequently simplified the implementation of the logistical processes in the simulation model.

Thus, the correctness of the executable model is observed and techniques of validation & verification accompany the simulation study (VDI 2014). Validation in dialog took place with experts from the company. For this purpose, the formal model, the model behavior, the prepared data, and the introduction of new parameters (e.g., the maximum number of buffer locations) were explained. The respective experts' comments and suggestions for correction were adopted in formalizing the system components.

For the simulation, a representative month was defined regarding the order volume. A week includes six working days in 24-hour shifts. Stochastic effects influence the model, and each simulation run has individual starting conditions (due to shift influences, machine failures, RDL initial inventory, ...). This makes it necessary to identify the transient phase to evaluate the simulation experiment independently of this period. Figure 3 depicts the progression of throughput over three months. According to Conway (1963), the transient phase ends after 12 days. According to Welch (1983), a pattern for the method appears from day 18. Due to the extended observation period of 3 months, a misinterpretation of the method's transient phase can be excluded, according to Conway (Gutenschwager et al. 2017). However, the settling period is 12 days. All collected statistics are, thus, reset after 12 days, and the measurements for the simulation experiment start there.

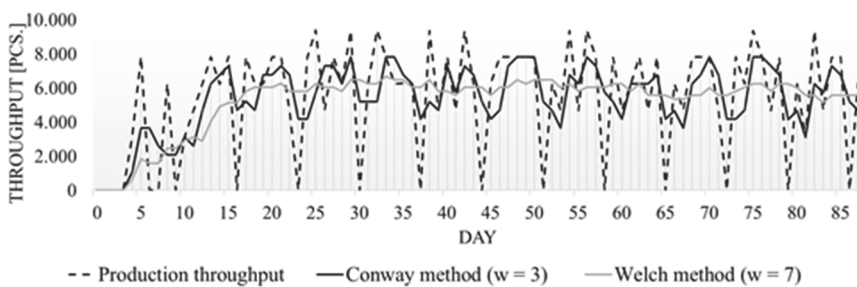


Figure 3: Transient phase according to Conway (1963) and Welch (1983)

As part of the first simulation scenario, comparing the current state with the target state, 30 simulation runs were performed for each state. Figure 4 shows the throughput of all produced items received in the distribution center. The throughput in the actual state is distributed between 130,000 and 185,000 pieces, whereas the target state shows a distribution of 155,000 to 190,000 pieces. A comparison of the median shows a slight improvement in the throughput of 15,000, whereas comparing the boxes

shows an improvement in the throughput of about 5,000 pieces. Overall, there is a slight improvement in throughput in the target state.

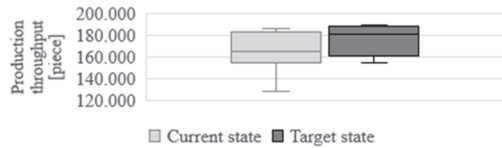


Figure 4: Comparison of the production throughput

Besides throughput, inventory is another important key figure to be evaluated (Figure 5). This indicator shows a decline in inventory for the target state. However, some of the identified outliers have the same high inventory as in the current state of the value stream. Overall, this indicates a marginal change in inventory.

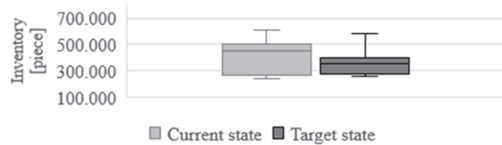


Figure 5: Comparison of inventories

Finally, the lead time needs to be considered. Figure 6 shows the allocation of lead times. The target state enables significantly shorter lead times, but this configuration also leads to the risk of substantially longer lead times. Thus, the overall variation has increased. Although this indicates a slight improvement in lead times, significantly longer lead times than in the current state are also possible, which does not meet the target of shorter lead times.

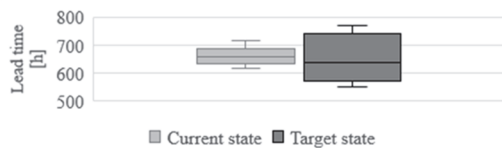


Figure 6: Comparison of lead times

In addition to the throughput, inventory, and lead time evaluation, machine utilization rates and the distances driven by the forklifts were also examined. The machine utilization rates have only slightly changed between the two scenarios. For example, the utilization of an exemplary machine is 50.5 % in the current state and 52.4 % in the target state. All the forklifts considered together have driven around 625 km in both scenarios.

Crucial measures and strategies for the partner company could be identified from the investigations listed in Table 1. Exemplary, the identified Measure 9 can be

highlighted, which was carried out directly after the investigations and enables a much stronger data collection and transparency.

Table 1: Table of corresponding measures

Catalog of measures	
Measure 1	Increase the output rate of the pacing process machine
Measure 2	Increase reliability of pacing process machine
Measure 3	Reduce setup times of four machines
Measure 4	Introduce a finished goods supermarket with an annual adjustment to peaks in demand
Measure 5	Introduce self-controlling systems (pull principle)
Measure 6	Dimension & introduce supermarkets (Günthner et al. 2013)
Measure 7	Define & implement scrap feedback
Measure 8	Introduce production leveling with a Heijunka box
Measure 9	Introduce two production data acquisition (PDA) terminals
Measure 10	Introduce the value-stream-oriented KPI-system

8 Summary and Outlook

The circumstances illustrate that the combination of value stream analysis and simulation has increased transparency by enabling KPIs to evaluate the defined target states and is a useful application for KPIs in the cold-forming sector. Furthermore, bottlenecks can be determined. Especially, the SME's old machinery in the cold forming field makes a combination of processes particularly important. Thus, the investigation showed that these machines did not provide any information. The following simulation study was only possible with a value stream analysis, as the data basis proved insufficient. Most data around the machine, like replenishment times, could only be determined by sampling or estimations. Overall, it can be seen that even without the purchase of new machines, an improvement can be achieved in cold forming using a combination of both methods.

References

- Appenzeller, H.: *Kostenoptimierte Anwendungsentwicklung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2021.
- Becker, W.; Ulrich, P.; Botzkowski, T.: *Industrie 4.0 im Mittelstand*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017.
- Bertagnoli: *Lean Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2018.
- Clausen, U.; Dabidian, P.; Diekmann, D.; Goedicke, I.; Potting, M.: Analysis of assignment rules in a manually operated distribution warehouse. In: 2013 Winter Simulation Conference, Washington, DC (USA), December 8th –11th 2013, pp. 3430–3439.
- Conway, R.W., 1963: Some tactical problems in digital simulation. *Management Science* 1963 (10), pp. 47–61.

- Dingli, A.; Haddod, F.; Klüver, C. (eds.): Artificial intelligence in industry 4.0. Cham: Springer International Publishing 2021.
- Eggers, F.: Masters of disasters? Challenges and opportunities for SMEs in times of crisis. *Journal of business research* 116 (2020), pp. 199–208.
- Erlach, K.: Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. Berlin: Springer Vieweg 2020.
- Ford Dickie, H.: ABC Inventory Analysis shoots for dollars, not pennies. In: *Factory Management and Maintenance* 109 (1951), pp. 92–94.
- Gottmann, J.: Produktionscontrolling. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016.
- Günthner, W.A.; Durchholz, J.; Klenk, E.; Boppert, J.: *Schlanke Logistikprozesse*. Berlin, Heidelberg: Springer 2013.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2017.
- Hartini, S.; Ciptomulyono, U.; Anityasari, M.: Extended value stream mapping to enhance sustainability: A literature review. In: *AIP Conference Proceedings*, Miri (Malaysia), December 6th–8th 2017, Article 20030.
- Kaiser, J.: *Logistische Planungsalternativen im Wertstromdesign: Ein Ansatz zur Identifikation und Auswahl von Soll-Zuständen in der Materialflussgestaltung innerbetrieblicher Wertströme*. Düren: Shaker 2021.
- Klevers, T.: *Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design: Verschwendung erkennen – Wertschöpfung steigern*. München: mi-Wirtschaftsbuch 2009.
- Miklian, J.; Hoelscher, K.: SMEs and exogenous shocks: A conceptual literature review and forward research agenda. *International Small Business Journal: Researching Entrepreneurship* 40 (2022) 2, pp. 178–204.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new procedure model for verification and validation in production and logistics simulation. In: Mason, S.J.; Hill, R.R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (eds.): *Winter Simulation Conference*, Miami, FL (USA), December 7th–10th 2008, pp. 1717–1726.
- Romero, L.F.; Arce, A.: Applying value stream mapping in manufacturing: A systematic literature review. *IFAC* 50 (2017) 1, pp. 1075–1086.
- Rother, M.; Shook, J.; Wiegand, B.; Womack, J.P.; Jones, D.T.: *Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Mülheim an der Ruhr: Lean Management Institut 2018.
- Sohny, T.: *Referenzmodell basierend auf der Wertstrommethode zur Bewertung von automatisierten Materialflusssystemen der Produktion in der Angebotsphase*. Dissertation, TU Dortmund University, IT in Production and Logistics 2022.
- Suhadak, N.S.; Amit, N.; Ali, M.N.: Facility layout for SME food industry via value stream mapping and simulation. *Procedia Economics and Finance* 31 (2015), pp. 797–802.
- Urnauer, C.; Metternich, J.: Die digitale Wertstrommethode. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019), S. 855–858.
- VDI: *VDI 3633 Simulation of systems in materials handling, logistics and production. Part 1: Fundamentals*. Berlin: Beuth 2014.
- Welch, P.D., 1983: The statistical analysis of simulation results. In: Lavenburg, S. S. (eds.): *Computer Performance Modeling Handbook*, New York, NY (USA), pp. 268–328.
- Wiese, J.: *Simulationen in KMU: Eine erste Bestandsaufnahme*. In: Sucky, E.; Werner, J., Kolke, R.; Biethahn, N. (eds.): *Mobility in a globalised world* 2015. Bamberg: University of Bamberg Press 2016, pp. 183–189.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Evaluation of Different Use Case Configurations in a Robotic Mobile Fulfilment System

Beurteilung unterschiedlicher Use Case-Konfigurationen in einem Robotic Mobile Fulfilment System

Julia Wenzel, Giorgi Tadumadze, Ralf Elbert, Felix Weidinger,
Technische Universität Darmstadt, Darmstadt (Germany),
wenzel@log.tu-darmstadt.de, giorgi.tadumadze@tu-darmstadt.de,
elbert@log.tu-darmstadt.de, felix.weidinger@tu-darmstadt.de

Simon Emde
Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena (Germany),
simon.emde@uni-jena.de

Abstract: In recent years, hybrid order picking systems like Robotic Mobile Fulfilment Systems (RMFS) have become established and widely used in e-commerce. Companies from other logistics areas with different use cases often decide against investing in RMFS due to high investment risks or unknown performance benefits. This work contains a performance evaluation of three different use case configurations based on logistics areas in e-commerce and production conducted by a simulation model for multi-level RMFS with an integrated rolling planning approach. The model leads to a demonstrator supporting logistics managers in their decision-making. Those and other users can vary input parameters in the demonstrator, create different use case configurations, and run the simulation model to evaluate performance by key performance indicators (KPIs). The work depends on several discussions and interviews with logistics experts to define realistic use cases the logistics manager can identify.

1 Introduction

Mobile picking robots have been increasingly used in logistics for several years (Azadeh et al., 2019; Boysen et al., 2017a). In contrast to manual person-to-goods picking and automatic goods-to-person picking, individual shelves are moved by mobile robots and transported to a stationary picking base. A particular type of mobile picking robot is the Robotic Mobile Fulfilment System (RMFS), where mobile robots transport shelves (pods) through the shop floor to picking stations with order pickers

(Boysen et al., 2019). Compared to traditional order picking systems (picker-to-parts) in which pickers move to shelves in the warehouse, RMFS as a parts-to-picker system increases productivity (Boysen et al., 2017b).

Limited storage density and the possibility of analysing the performance of RMFS prevent companies from investing in this technology. A few recent publications about their performance by simulation studies exist (Merschformann et al., 2019). Nevertheless, performance evaluations in science are not attractive enough to logistics managers and their investment decision-making process if they do not seem predictable to them. Based on interviews with experts in logistics areas, we implemented a simulation model for multi-level RMFS with an integrated rolling planning horizon for analysing the performance of RMFS. In order to make the results more transparent and to support logistics managers, and other users, in their decision-making, the simulation model based on the software AnyLogic is extended to a demonstrator. It allows users to make decisions based on well-founded arguments resulting from the quantitative study of performance analysis of different use case configurations of RMFS that are similar to their shop floor. The user can define the input of the quantitative study via the demonstrator interface and vary different structures of order sizes, article types, or robot numbers. The performance analysis involves typical KPIs of throughput definitions, which are necessary to decide for or against a new logistics system resulting from discussions with logistics experts.

2 Recent literature

The integrated planning problems for the simulation model are described in this section to give an overview of the current state of the literature. Merschformann et al. (2019) present a simulation tool for RMFS, solving different planning tasks and problems and analysing performance. It becomes visible that the several solutions of the planning problems (see below) significantly influence the RMFS performance and, thus, the decision whether to use RMFS or not. The publications stated below revive the planning tasks introduced by Merschformann et al. (2019).

1. Allocating goods to individual shelves (cf. Weidinger and Boysen, 2018; Weidinger et al., 2018; Guan and Li, 2018, Kim et al., 2020).
2. Assignment of orders to picking stations & assignment of shelves to picking stations (cf. Tadumadze et al., 2022).
3. Order processing at the picking stations (cf. Boysen et al., 2017b).
4. Space allocation of shelves in the warehouse (cf. Merschformann et al., 2019; Li et al., 2021).
5. Control of transport orders of individual robots (cf. Zhu and Li, 2022; Xie et al., 2021).

It should be noted that there has not yet been a simulation study of the complexity of Merschformann et al. (2019). Other simulation studies in the context of RMFS relate to solving one or more (maximum two) planning problems. Simulation studies have not been used as a basis for comparison in this paper, as they do not have generic planning problems.

Further research was included to get a related simulation study with the central aspect of improvement of the system performance of RMFS. The current state of research is used to extend the considered assumptions in the work of Merschformann et al. (2019). An example is the use of ground-level storage RMFS warehouses which

causes the disuse of available warehouse height. Approaches, e.g., Xie et al. (2021) and Tadumadze et al. (2022), create multiple levels in RMFS to compensate for that. Furthermore, recent works on the performance analysis of RMFS also exist (cf. Duan et al., 2021; Gong et al., 2021; van Gils et al., 2018; Jaghbeer et al., 2020; Hanson et al., 2018; Duan et al., 2021; Gong et al., 2021; Lamballais et al., 2017).

3 Simulation approach and implementation

This section describes how simulation and optimization solutions are combined, and the discussion with focus interviews with experts from logistics fields is integrated.

This work addresses all mentioned planning problems and performance analysis approaches in the implemented simulation model to design the demonstrator. The simulation model extends the approach of RMFS of Merschformann et al. (2019) by creating a simulation model for multi-level RMFS with a rolling planning approach. Often, exact optimization solutions are verified with simulation studies as mathematical optimization (Juan et al., 2015). With this work, we want to present a realistic simulation model (combined with heuristic solutions) for use in practice and integrate experts' decision outcomes in the implementation phase: The demonstrator aims to make optimization approaches more accessible to users and logistics managers by implementing a parametrized simulation model. The user can handle it by defining input parameters for each optimization instance (performed in optimization heuristics).

For performance evaluation of different use cases in RMFS and better height utilization (dimensions comparable to an automated warehouse), this work pursues a multi-level RMFS warehouse designed for high-bay racking. As illustrated in Figure 1, three steps had to be implemented to create the demonstrator. The planning problems mentioned in section 2 are implemented in the simulation model in the first step, followed by constructing an initialization instance (step 2) and the consolidation into a demonstrator in step 3.

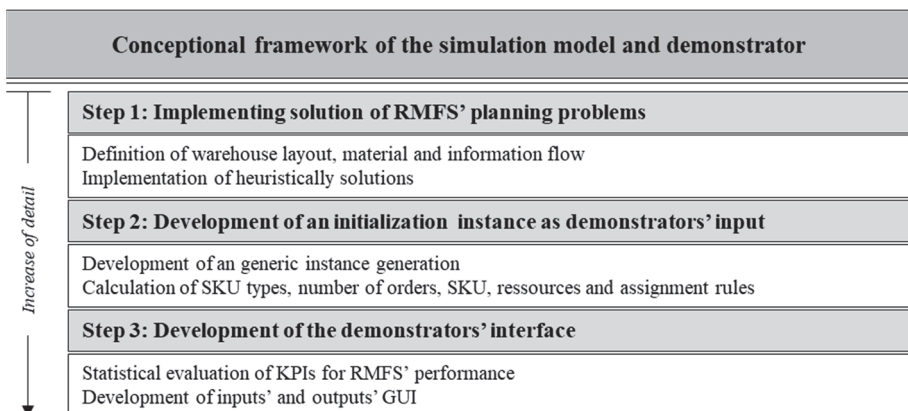


Figure 1: Process of creating the demonstrator for evaluating configurations of RMFS

3.1 Step 1: Implementing planning problems' solutions

The demonstrator includes a simulation model extending the approaches of Xie et al. (2021) (multi-level RMFS) and Merschformann et al. (2019) (demonstrator for RMFS). The development of the demonstrator is based on a simulation concept that reflects the order picking process from the robot's perspective. For that reason, agent-based simulation is used to implement the robot as an interactive agent and analyse its behaviour and interactions with other robots in the fleet (Borshchev, 2013).

The simulation model displays the material and information flow of the mobile robots in RMFS. All planning problems, according to section 2, have been considered and solved heuristically in the simulation model with a focus on the heuristic solution of Tadumadze et al., 2022 which aims to distribute all orders evenly on the order picking stations, minimize the robots' movements and maximize the order picking stations' throughput. Furthermore, the simulation model also includes a rolling planning approach with a planning horizon t . Rolling planning horizons are introduced in production and warehouse planning to control and optimize stock levels or order processing. Rolling planning is profitable in this context to regularly set new orders into the system. In this way, continuous planning and management of arrivals are replicated, which are the main aspects regarding the interviews with logistics experts. A distinction between different planning horizons also allows the definition of different scenarios and is considered an input parameter for the following step. The associated concept is shown as a flow chart in Figure 2.

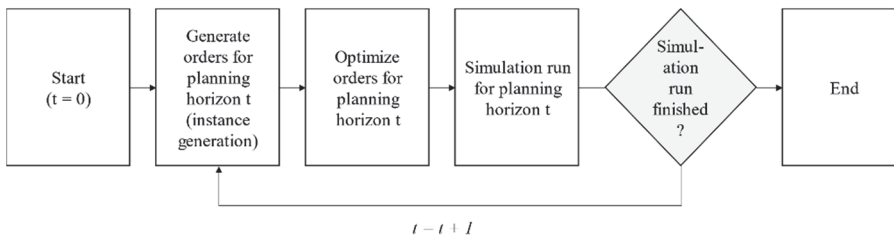


Figure 2: Concept of rolling approach

3.2 Step 2: Development of initialization instance

The aim of instance generation at the second level of detail is to capture an initial state. An essential aim of the validation and verification is the definition of a most realistic instance. Therefore, the discussions with logistics experts resulted in the decision that the orders be processed in the time horizon t under consideration, their composition from the individual Stock Keeping Unit Types (SKU types), and the number of ordered SKUs and SKUs available in the warehouse define the most influencing parameters for RMFS. To create a demonstrator, it is necessary to avoid transient phases and use generic but realistic input variables in the simulation. Therefore, input parameters for an instance in this simulation model are:

- the average order size
- the number of robots used
- the number of SKU types
- number of pods

- number of orders in one planning horizon t
- number of stations
- the time window for planning horizon t

Different numbers of robots, pods, and picking stations are considered resources. Further components of the instance generation are the ABC structure of the shelf storage. The Pareto principle represented an exponential distribution function in the first dimensioning. Thus, it was assumed that the group of A-items represents 80 % of the total orders of a planning period. These contain 20 % of the available articles. This ratio can also be varied via a factor λ .

3.3 Step 3: Development of the demonstrator

The user of the demonstrator can vary the initial state of input parameters, mentioned in section 3.2, via Graphical User Interface (GUI), shown in Figure 3. The input parameters define an instance for optimization and the necessary input for starting the simulation model. Thus, the user can adopt different system configurations, reflecting different use cases. Handling multiple configurations of RMFS resulted from the discussion with logistics experts. The interpretation of the performance analysis is more comprehensible for users if they can identify the use case configuration with their logistics application area. Existing instances from given studies can only be interpreted in a limited way.

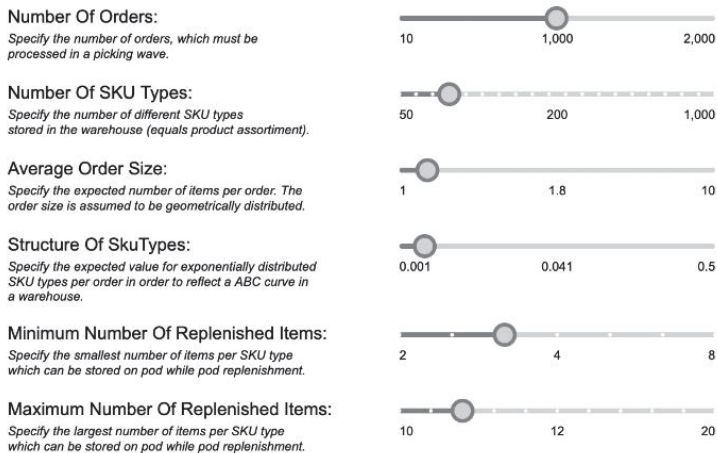


Figure 3: Exemplary screenshot of the demonstrator's input parameters (own illustration)

4 Analysis of different use case configurations

To illustrate how to analyse different configurations of use cases in RMFS, a simulation study is performed in the next section of this paper. Three use cases reflect hypothetical scenarios of different application areas for RMFS. The objective is to show how to use the simulation model and to clarify the interfaces between the simulation and the demonstrator.

A simulation study with three different instances is conducted as part of this work. Each instance represents a different use case configuration which can be selected via the demonstrator's input GUI. The selected use case configurations are listed in Table 1. The analysis of the different use cases is intended to identify an optimal configuration for RMFS for the user of the demonstrator. It will also be investigated which configuration best adapts to the system. Use case configuration 1 reflects a typical e-commerce scenario (e.g., Same-Day-Delivery of different products); use case configurations 2 and 3 correspond to a production warehouse. First one (use case configuration 2) represents a supermarket with low SKU type variety in the production line (e.g., containers with screws next to a pre-assembly line). Use case configuration 3 is an example of a warehouse with many products (e.g., a warehouse after assembling the products). The design of instance implementation is based on interviews with experts who validate those use case scenarios.

Table 1: Assumptions for simulation study according to each use case configuration

	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
use case area	e-commerce	supermarket	outbound
the average order size	1,4	4,6	10,6
the number of SKU types	200	50	500
number of pods	750	750	750
number of orders in t	1000	1000	200
lambda	0,041	0,160	0,018
number of stations	15	15	15
the time window for t	30 min	30 min	30 min
the number of robots	9	9	9

With the provided simulation data of the input GUI, it is possible to run Monte-Carlo simulations based on internal sources of randomness (Borshchev, 2013). It enables the analysis of the different scenarios in comparison to each other. The stochastic random distributions are implemented in the instance generation and thus form an integrated stochastic model. Many repetitions are carried out with the assumptions made to map Monte Carlo simulations. The determination of the simulation frequency and thus the necessary number of simulation runs n is based on the defined key performance indicator *Hit Rate* according to Merschformann et al. (2019) which is defined as ratio between the "Total Number of Picked SKUs" and the "Total Number of Pod Visits". The ratio is measured at the end of the simulation runs (simulation period $L(t) = 60 \text{ min}$). A negative value of this ratio would reveal a faulty simulation run in which too frequent or unresolvable blocking operations of the picking robots occur. The system performance in the respective use case configuration is measured by the typical key performance indicator "Total Number of Fulfilled Orders" and

"Total Number of Picked SKUs" in a logistics system. The first KPI reflects the possible warehouse throughput. The second is a central KPI for picking efficiency. Both KPIs are used in science (in reference to the literature of section 2) and practice to measure the performance and efficiency of a logistics process and form the framework for decisions by logistics managers. The simulation study results are summarized in Table 2 as averaged values. The results are considered at all levels of this multi-level RMFS.

Table 2: Simulation study results

	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
use case area	e-commerce	supermarket	outbound
Total Number of Fulfilled Orders	1268	205	92
Total Number of Picked SKUs	1978	1732	1739
Hit Rate	9,374	16,654	7,464

Based on the simulation study results, evaluating different use case configurations for RMFS is possible. Visualization with GUI is important for interpreting simulation results (Wenzel et al., 2003). We use this possibility to connect the simulation model with GUI and create the demonstrator. All output parameters are collected in a database and displayed in the GUI (Figure 5). To consolidate the results, the demonstrator's approach is to represent the mentioned KPIs as output parameters.

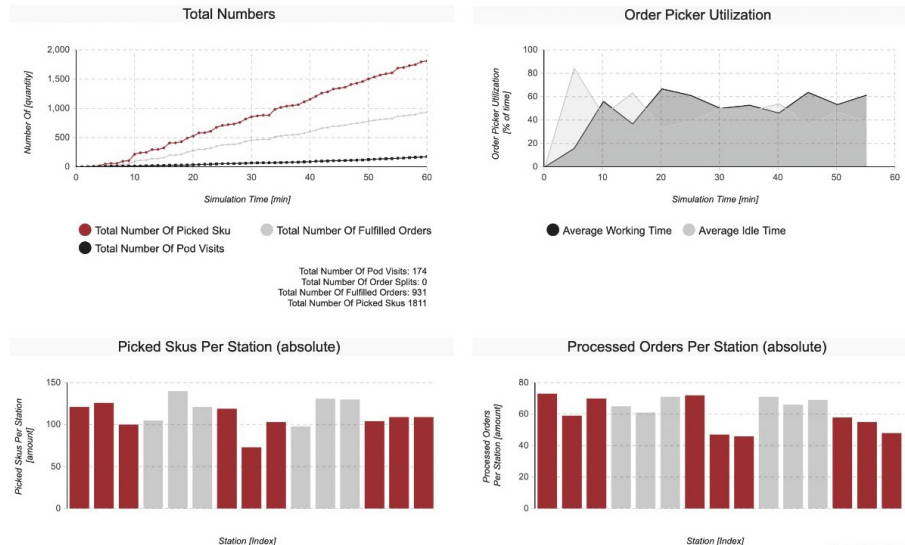


Figure 4: Exemplary screenshot of the demonstrator's output parameters (own illustration)

The decision on the system variables and input parameter variation are based on interviews with practical experts from logistics areas or production fields. On the one hand, they validate the opportunity to take the demonstrator as a tool for consultation hours with simulation experts. On the other hand, the interviews conclude with the construction of use case scenarios close to reality. In this regard, it is obvious that using the demonstrator is more cost-effective than implementing the system directly.

The demonstrator operates as decision-support, and the subsequent analysis of the different configurations aims to make clear the advantages of simulation for supporting decisions in logistics areas. The main advantages are the closeness to reality, the flexibility, the scalability, and the predictability of the simulation model (Borshchev, 2013). Furthermore, the agent-based simulation enables the mapping of different behaviours and, in this context, the behaviour of the logistical system. The model can be flexibly extended in the simulation in order to be able to carry out further investigations if the previously set conditions have changed or the analysis focus of logistics areas is changed.

To give an example of flexibility, the GUI of output parameters (Figure 5) represents additional KPIs related to RMFS. These are the "Total Number of Pod Visits", the "Order Picker Utilization", as well as the distributions of the "Picked SKUs Per Station" and the "Processed Order Per Station". Those KPIs enable the evaluation of the utilization of a picker and the distribution of individual orders to the different stations.

5 Conclusion

Evaluating different use case configurations of RMFS is essential in decision-making to find the best possible configuration for the respective requirements and thus ensure an effective and efficient logistics solution. This work shows how a simulation model of multi-level RMFS with integrated rolling planning approach can be integrated into a demonstrator. A simulation study is performed to present how users of the demonstrator can analyse different use case configurations. Therefore, three use case configurations of logistics areas in e-commerce and production are defined and analysed by the main KPIs.

The variation of input parameters can analyse new use case configurations. Therefore, logistics managers can achieve initial information about the performance of RMFS. Ideally, they can identify with the use case configuration and take these results as support for or against the system. For better validation, the input and output parameter decisions are grounded on interviews with experts from several logistics areas.

However, the discussions with those experts have created a realistic model. Some assumptions of the system (e.g., neglect of energy consumption or cost calculation) are limitations of the work. Those aspects can also be content of future work implemented in the presented simulation model. The focus can therefore be shifted from analysing the whole system's performance to analysing each robot's performance. Further research can include evaluating robot blocking processes on the shop floor and analysing robot behaviour - adding KPIs such as the waiting time of each robot in front of order picking stations or the delay times of each robot due to blocking.

Acknowledgement

This work is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action based on a resolution of the German Bundestag, specifically by the German Federation of Industrial Research Associations (AiF), Industrial Collective Research (IGF): Project number IGF-20351 N, further project results are available via IGF. The authors would also like to thank the project partners (logistics providers and experts from the industry) for their insightful comments and suggestions, who declare they have no financial interests.

References

- Azadeh, K.; Koster, R. de; Roy, D.: Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. *Transportation Science* 53 (2019) 4, pp. 917–945.
- Borshchev, A.: The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6. S.I.: AnyLogic North America 2013.
- Boysen, N.; Briskorn, D.; Emde, S.: Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots' environment. *European Journal of Operational Research* 262 (2017a) 2, pp. 550–562.
- Boysen, N.; Briskorn, D.; Emde, S.: Sequencing of picking orders in mobile rack warehouses. *European Journal of Operational Research* 259 (2017b) 1, pp. 293–307.
- Boysen, N.; Koster, R. de; Weidinger, F.: Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research* 277 (2019) 2, pp. 396–411.
- Duan, G.; Zhang, C.; Gonzalez, P.; Qi, M.: Performance evaluation for Robotic Mobile Fulfillment Systems with time-varying arrivals. *Computers & Industrial Engineering* 158 (2021), pp. 107365.
- Gong, Y.; Jin, M.; Yuan, Z.: Robotic mobile fulfillment systems considering customer classes. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 16, pp. 5032–5049.
- Guan, M.; Li, Z.: Genetic Algorithm for Scattered Storage Assignment in Kiva Mobile Fulfillment System. *American Journal of Operations Research* 08 (2018) 06, pp. 474–485.
- Hanson, R.; Medbo, L.; Johansson, M.I.: Performance Characteristics of Robotic Mobile Fulfillment Systems in Order Picking Applications. *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018) 11, pp. 1493–1498.
- Jaghbeer, Y.; Hanson, R.; Johansson, M.I.: Automated order picking systems and the links between design and performance: a systematic literature review. *International Journal of Production Research* 58 (2020) 15, pp. 4489–4505.
- Juan, A. A.; Faulin, J.; Grasman, S. E.; Rabe, M.; Figueira, G.: A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. *Operations Research Perspectives* (2015) 2, pp. 62–72.
- Kim, H.-J.; Pais, C.; Shen, Z.-J.M.: Item Assignment Problem in a Robotic Mobile Fulfillment System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 17 (2020) 4, pp. 1854–1867.
- Lamballais, T.: Inventory Allocation in Robotic Mobile Fulfillment Systems. *SSRN Electronic Journal* (2017).

- Lamballais, T.; Roy, D.; Koster, M. de: Estimating performance in a Robotic Mobile Fulfillment System. *European Journal of Operational Research* 256 (2017) 3, pp. 976–990.
- Li, X.; Yang, X.; Zhang, C.; Qi, M.: A simulation study on the robotic mobile fulfillment system in high-density storage warehouses. *Simulation Modelling Practice and Theory* 112 (2021), pp. 102366.
- Merschformann, M.; Lamballais, T.; Koster, M. de; Suhl, L.: Decision rules for robotic mobile fulfillment systems. *Operations Research Perspectives* 6 (2019), pp. 100128.
- Tadumadze, G.; Wenzel, J.; Emde, S.; Weidinger, F.; Elbert, R.: Assigning orders and pods to picking stations in a multi-level robotic mobile fulfillment system. *Flexible Services and Manufacturing Journal* (2023), pp. 1–38.
- van Gils, T.; Ramaekers, K.; an Caris; Koster, R.B. de: Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. *European Journal of Operational Research* 267 (2018) 1, pp. 1–15.
- Weidinger, F.; Boysen, N.: Scattered Storage: How to Distribute Stock Keeping Units All Around a Mixed-Shelves Warehouse. *Transportation Science* 52 (2018) 6, pp. 1412–1427.
- Weidinger, F.; Boysen, N.; Briskorn, D.: Storage Assignment with Rack-Moving Mobile Robots in KIVA Warehouses. *Transportation Science* 52 (2018) 6, pp. 1479–1495.
- Wenzel, S.; Bernhard, J.; Jessen, U.: A taxonomy of visualization techniques for simulation in production and logistics. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, (2003), pp. 729–736 Vol.1.
- Xie, L.; Thieme, N.; Krenzler, R.; Li, H.: Introducing split orders and optimizing operational policies in robotic mobile fulfillment systems. *European Journal of Operational Research* 288 (2021) 1, pp. 80–97.
- Zhu, L.; Li, H.: Workstation layout strategies in Robotic Mobile Fulfillment Systems considering carbon emissions. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 4 (2022), pp. 100050.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Logistics Objective Conflicts at Intermodal Terminals

Logistische Zielkonflikte in intermodalen Terminals

Michaela Grafelmann, Volodymyr Aliexsieiev, Hermann Lödding, Carlos Jahn
TU Hamburg, Hamburg (Germany), michaela.grafelmann@tuhh.de,
volodymyr.aliexsieiev@tuhh.de, loedding@tuhh.de, carlos.jahn@tuhh.de

Abstract: Gantry cranes are essential working systems at intermodal terminals. Their operation faces conflicting logistical objectives, such as improving the throughput time of the loading units, increasing the handling output, or reducing the waiting times of vehicles. Possible methods for analysing such conflicting objectives are Logistic Operating Curves (LOC) and throughput diagrams, which have found application in production logistics and can be derived and verified using simulation. In this paper, a simulation model for intermodal terminals is proposed to parameterize characteristic LOC. The LOC are used to analyse the conflict between the target values of a high output rate and a low throughput time.

1 Introduction and Problem Definition

Combined transport, i.e. the combination of road, waterway, and rail transport modes, can make a very important contribution to achieving the sustainability goals, as most of the transport distance can be carried out on the environmentally friendly modes of rail or waterway and leaving only the pre-carriage and/or onward carriage to road transport. However, the handling times and costs at the intermodal transshipment terminals limit the competitiveness of combined transport (e.g. Pinto et al. 2018; Heinold and Meisel 2019).

Key to improvement is the control of gantry cranes as the essential working system of many intermodal terminals. The cranes provide links between modes of transport and to the intermediate storage areas for loading units (LU). Important objectives of intermodal terminals are the fast and punctual handling of trains and ships and the reduction of waiting times for trucks. These objectives have a significant influence on the performance of the terminals. Up to now, it has been possible to analyse these conflicting objectives with the help of complex approaches such as mathematical optimization, or comprehensive simulation studies (e.g. Guo et al. 2018; Colombaroni

et al. 2017). The complexity and application-specific character complicate the use of these methods in practice.

What is lacking is a simple, comprehensible model that depicts the relationships between the target variables and influencing variables with sufficient accuracy. In production, Logistics Operating Curves (LOC) have proven successful for this purpose. However, these have not yet been able to represent the processes at intermodal terminals. This paper proposes a simulation model of intermodal terminals in order to depict the logistics objective conflicts for further evaluation and parameterization of the characteristic LOC.

The paper is organized as follows: the introduction is followed by a theoretical background on intermodal terminals and the theory of LOC. The second chapter also contains a brief overview of the state of the research. In the third chapter, the methodological approach for the simulation-based creation of LOC is described. Then, the simulation model is discussed and the LOC are derived. The paper ends with a conclusion and an outlook on further research.

2 Theoretical Background and State of Research

In the following, the subject of the study, intermodal terminals, is addressed first (Section 2.1), followed by the LOC (Section 2.2).

2.1 Inland Intermodal Terminals

Inland intermodal terminals are hubs in national and international logistics chains. They therefore provide the environment and equipment for handling loading units between different modes of transport such as road, rail and waterway. Terminals include functional areas such as storage areas for LUs (e.g. containers, swap bodies, or semi-trailers) and the areas for the connected modes of transport (see Figure 1 for a bimodal *road-rail* terminal). Besides the number of modes connected, terminals differ in the additional value-added services they offer, such as buffering, holding empty containers in depots and repairs. The equipment used in terminals ranges from e.g. reach stackers to large gantry cranes spanning the different transport modes. In this paper, the focus is on bimodal road-rail terminals with gantry cranes.

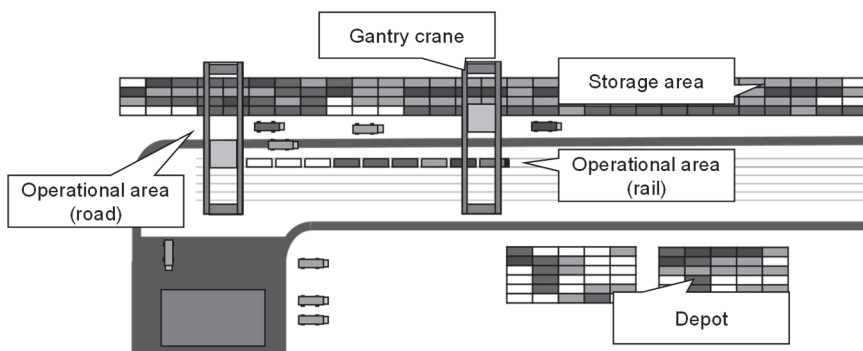


Figure 1: Terminal structure (cf. Krüger et al. 2023)

The logistics objectives of terminals have already been studied, e.g., using mathematical optimization models or simulation. For instance, Clausen and Kaffka (2013) focus on priority rules in crane operation. Kuhlmann (2013) presents an optimization model that aims to minimize the duration and costs of transshipments at terminals. The author reviews also other scientific works aiming at the optimization of certain logistics objectives of transshipment terminals using mathematical optimization methods. Colombaroni et al. (2017) address the minimizing problem of reshuffling containers in an inland intermodal terminal using a simulation-optimization approach that takes into account the operational costs for storage and pick-up operations. Guo et al. (2018) are concerned with the scheduling of gantry cranes in rail/road container terminals. They take a bi-objective approach and consider efficient crane scheduling and fast service times of external trucks.

However, to the authors' knowledge, there are no publications that consider the conflicting objectives of terminals by means of LOC.

2.2 Logistic Operating Curves

LOC depict graphically a correlation between dependent (objective) and independent variables. In production logistics, where the LOC find the most common use, represent the logistics objectives e.g. throughput time, capacity utilization, or output rate (Nyhuis and Wiendahl 2009). The work in progress (WIP) can thereby be defined as an independent variable due to the ability to control it using different methods (Nyhuis and Wiendahl 2009; Lödging 2013). To reach a high level of output rate and capacity utilization, a high level of the WIP is needed, which leads to longer throughput times. This dependence represents one of the important objective conflicts in production logistics. The LOC enable the quantification of such correlations and logistic positioning between their corresponding variables (Nyhuis and Wiendahl 2009).

Figure 2 depicts the ideal and real LOC for the aforementioned objective conflict between output rate (ROUT) and throughput time (TTP) of a work system. The ideal process implies, among others, the assumptions, that neither a work system is idle, nor orders are waiting for the free workstation capacity (Nyhuis and Wiendahl 2009). In the ideal case, the minimum ideal WIP ($WIP_{I_{min}}$) describes the minimum required WIP level to gain the maximum possible output rate ($ROUT_{max}$). Higher levels of WIP do not lead to a higher output rate, but to a longer throughput time only (Lödging 2013; Nyhuis 1991). The mean TTP can be calculated at any arbitrary point of the LOC using the funnel formula (Bechte 1984):

$$TTP_m = \frac{WIP_m}{ROUT_m} \quad (1)$$

In this equation, WIP_m and $ROUT_m$ represent their corresponding mean values. A proportional increase of ROUT and WIP as well as a constant TTP define the so-called proportional operating zone. The rising TTP and WIP values and a constant ROUT feature the saturated operating zone (Nyhuis and Wiendahl 2009).

Furthermore, based on the funnel formula, the throughput diagram as an additional instrument for analysing the interdependence between WIP, input and output rates as well as throughput time can be constructed (Nyhuis and Wiendahl 2009).

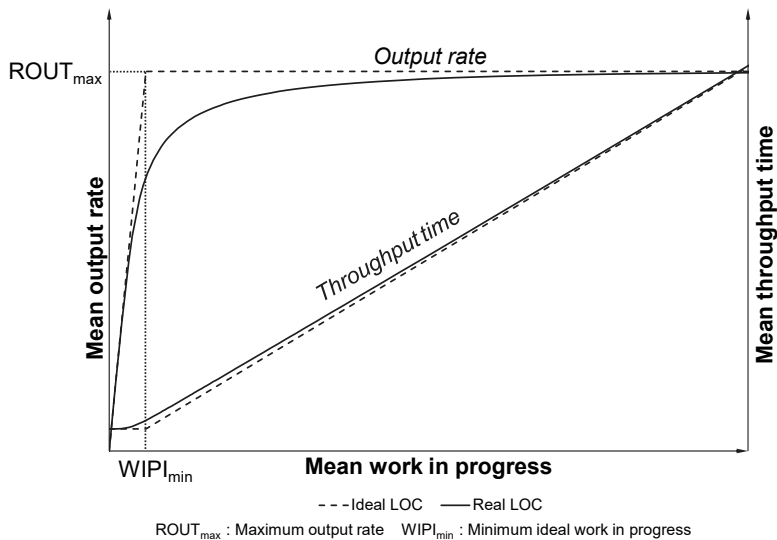


Figure 2: Ideal and real LOC (cf. Nyhuis and Wiendahl 2009)

Simulating realistic conditions, i.e. varying interarrival times, yields to different operating points and obtaining corresponding mean values of output rate and WIP it is possible to obtain the real LOC for output rate and throughput time (Nyhuis and Wiendahl 2009, Lödging 2013). Their key distinction comparing to the ideal process curves builds the transition area between the proportional and saturated zones. A deviation of the real LOC from the ideal curves in this area is generated by e.g. the corresponding fluctuations in the load, capacity flexibility as well as transport time and work content. Nyhuis and Wiendahl (2009) derived an approximation equation for the real LOC for the output rate.

As mentioned above, the derivation and validation of the LOC can be performed using simulation. Nyhuis and Wiendahl (2009) use the simulation software PROSIM III to derivate the production operating curves, which show the interrelation between the mean WIP and the mean output rate of a production system (see Figure 2). Engehausen (2021) applies discrete event simulation software Plant Simulation to create operating curve for workstations with sequence-dependent setup times, which visualize the dependence between the number of setup families and the performance of a production system for different WIP levels. Trzyna (2015) used Plant Simulation to evaluate the LOC for throughput times of rush orders and their influence on the throughput time of normal orders in production. Busse (2013) applied simulation for deriving the load fluctuation influence on the stretch factor of the LOC. Winter et al. (2021) explored the influence of load flexibility on the LOC to support the derivation of a load flexibility factor.

In addition to the derivation and verification of production operating curves, simulation was also used for the validation of transport operating curves. Egli (2002) verified the interdependencies between transport WIP, performance, and throughput time of a warehouse transport system to create the corresponding operating curves using the simulation program DOSIMIS. Seitz (2016) used discrete-event simulation with Microsoft Excel (Visual Basic for Applications) to verify the transport operating

curve, which visualizes the interrelation between minimal transport load percentage and mean throughput time of linear multi-transport systems.

To the authors' knowledge, the LOC-based analysis of objective conflicts, as they are found at intermodal terminals, has not been addressed in existing publications.

3 Methodological Approach

This paper is based on the framework shown in Figure 3.

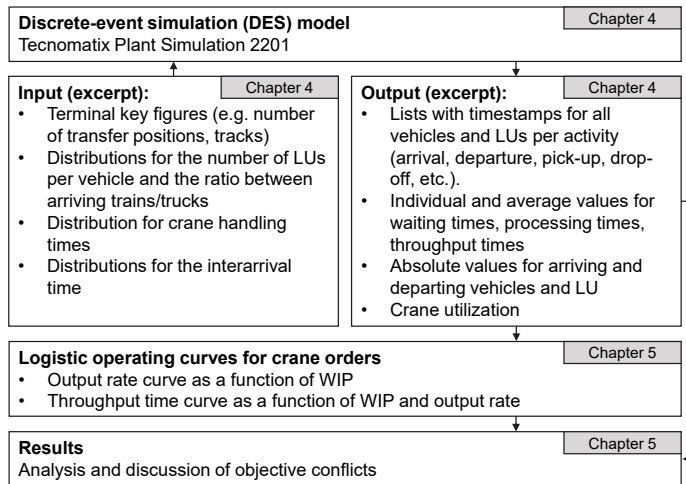


Figure 3: Framework

The discrete-event simulation (DES) can evaluate the relevant logistics objectives (see outputs such as waiting times, handlings per LU, etc.) and support the creation of the LOC. Tecnomatix Plant Simulation 2201 is used because it has proven to be a suitable tool for the discrete-event modelling of logistics processes (e.g. Engehausen 2021; Trzyna 2015). The framework further includes modelling and evaluating LOC.

The DES model is built in such a way that all relevant input values can be adjusted by the user via an interface. In this way, different terminal configurations (e.g. number of transfer positions, tracks, etc.) can be taken into account, which is of interest for future considerations. Modular control strategies can also be selected (e.g. only one vehicle at a time within the terminal, the first in is the first out, etc.). The approach is to use the outputs of the simulation on the one hand to verify and validate the model, and on the other hand as a basis for the LOC. Both together allow for a comprehensive system analysis.

4 Model Description

As described in Chapter 3, there is the possibility to adapt the simulation model to different terminal configurations. Figure 4 illustrates the possibility of adjusting the number of positions (gray squares) for loading units in the terminal. These represent stations in the simulation model between which the elements (LUs) can move.

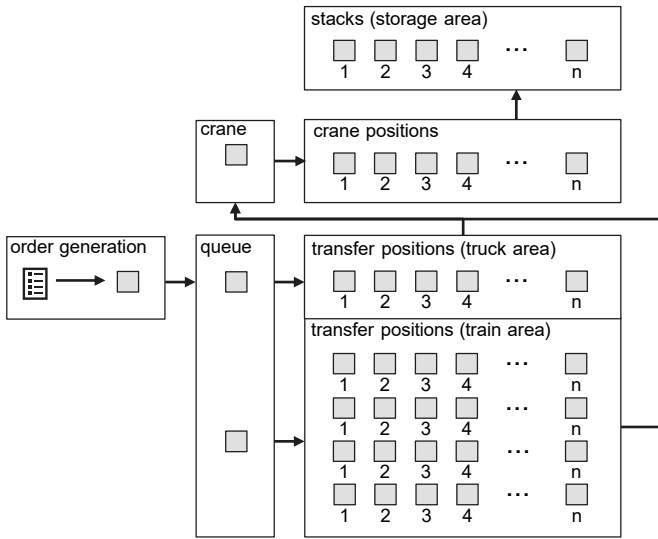


Figure 4: Schematic structure of the simulation model

At the beginning of the simulation, train and truck arrivals are generated and stored in a list based on random numbers and interarrival times (IAT) over a ramp-up phase of 100 crane orders and for the subsequent simulation time (adjustable, set to 24 hours, see Table 1 for more assumptions made for the experiment design). It is randomly determined whether a truck arrives with one or two LUs. For trains, the number of LUs is determined based on a triangular distribution. The model currently does not differentiate between different types of LUs (regarding size, stacking capability, etc.).

In the model, once incoming LUs have a transfer position, they are stored in a list with a timestamp, which is processed by the crane on a first-come-first-served basis. The storage area consists of one large stack per row, so in simplified terms only the travel time of the crane along the storage area is considered and not a comprehensive storage strategy. Crane handling times are mapped using a triangular distribution (see Table 1). The LUs are transferred to the storage area next to their transfer position.

Table 1: Simulation model assumptions

Parameter	Assumption
Number of (transfer) positions/stacks (n)	28
Number of tracks	4
Number of gantry cranes	1
Number of LUs per truck arrival	on average 20% arrive with two LUs
Number of LUs per train arrival	triangular distribution (c=23, a=18, b=28)
Handling time of crane	triangular distribution (c=2:00, a=1:45, b=2:15) [min]
Transport time of crane	4 seconds between two stacks

The simulation model allows for automated runs, with 50 observations per experiment with different random number streams. The design of experiments provides changing IATs for each experiment, considered in a normal distribution. The expected value μ is adjusted for each experiment, whereas the standard deviation σ stays the same (5 minutes). For μ from 260 to 900 seconds, experiments are considered in 10-second increments and for 900 to 7200 seconds, in 60-second increments.

To enable the LOC-based analysis of objective conflicts in the simulated terminal, the above-mentioned gantry crane was considered as a work system. Each crane order includes one crane handling only. To show the applicability of simulation for deriving the LOC, the objective conflict between WIP, ROUT, and TTP, described in Section 2.2, was considered. Thereby the analysis of the following outputs from the simulation model applies, adapted according to the terminology of the LOC theory:

- WIP: mean number of crane orders waiting to be processed by the gantry crane;
- ROUT: number of crane orders per day being completed during the simulation period;
- TTP: ratio between the corresponding mean values of WIP and ROUT according to the funnel formula (1) represented in hours.

The above-described parameters have been received as means of all simulation runs for each value of the IAT. Table 2 shows exemplary the output data set.

Table 2: Output scheme of the simulation model for the further construction of the LOC on the example of crane orders

Input IAT	Output		
	WIP	ROUT	TTP
260	WIP _{K260}	ROUT _{K260}	TTP _{K260}
...
7200	WIP _{K7200}	ROUT _{K7200}	TTP _{K7200}

5 Results and Discussion

Analog to the simulation-based construction of LOC for production processes (see Section 2.2), the LOC for output rate of crane orders results when plotting the simulated operating points in a two-axis-coordinate system with corresponding values of WIP (x-axis) and ROUT (y-axis). Depicting the corresponding values of TTP over the WIP reveals the operating curve for the throughput time (see Figure 5). Depiction of both mean output rate and mean throughput time operating curves visualizes the above-mentioned conflict between these objective values: whereas the growing WIP first increases the output rate with the relatively constant TTP (proportional zone), its further growth consequences a drastic rising of the TTP values (saturated zone). Moreover, the unusual effect of TTP reduction is observed in very small IAT, which may be due to the relatively short simulation duration of 24 hours, the assumptions regarding the ramp-up phase, and the ratio between train and truck arrivals.

A relatively long transition zone and a strong deviation from the production operating curves (Nyhuis and Wiendahl 2009), find the explanation e.g. in the fluctuation of crane transport times for different orders, which is due to the variance of start position (pick-up of LU) and end position (its drop-off in the yard) and in the variance of IATs.

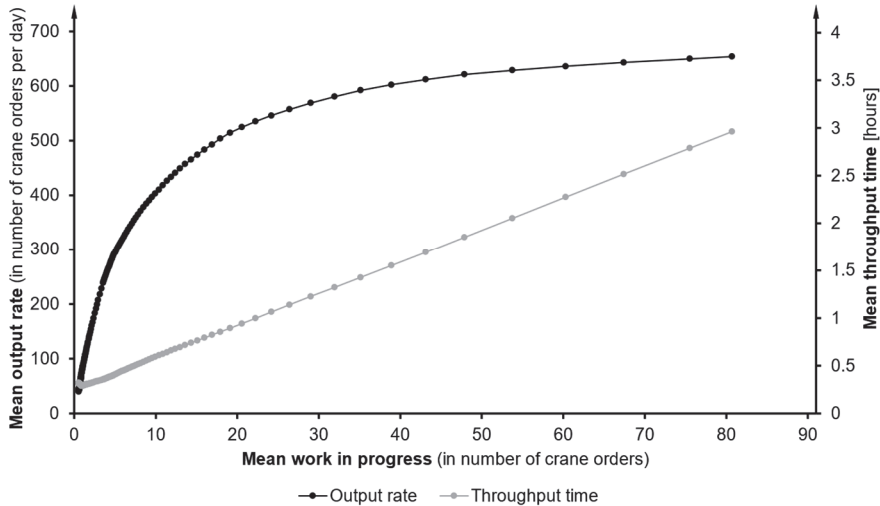


Figure 5: Simulated LOC for output rate and throughput time of crane orders

As mentioned in Section 2.2, the WIP, input, and output rates, as well as throughput times of orders for different IAT levels, can also be analysed using throughput diagrams. For this purpose, the input and output values are depicted cumulatively over time. A difference between these values in corresponding operating points depicts the corresponding WIP levels (Nyhuis and Wiendahl 2009).

To illustrate the dependence between the above-mentioned objective values based on the simulated inland terminal, two exemplary experiments with mean IAT=610 seconds (Figure 6) and mean IAT=270 seconds (Figure 7) have been considered. These IAT values enable the depiction of significantly different gantry crane capacity load experiments. The input curve in both diagrams illustrates the cumulative input order flow of the gantry crane (y-axis) over time (x-axis). The input corresponds to the incoming LU flow of the terminal, as a crane order is generated with the arrival of a LU. Train arrivals are easily detectable as big steps in the input, as many LUs arrive at the same time at the terminal. Correspondingly, truck arrivals go along with smaller growth. The output curve binds the points of completion of corresponding crane orders. The meeting of curves depicts the crane's idle time (Nyhuis and Wiendahl 2009). As can be seen from Figure 6, due to the higher values of IAT and occurring crane idling, the output rate is smaller. Nevertheless, it goes along with the reduction of the mean throughput time of crane orders, as the waiting time for the free crane capacity reduces. In the case of lower IAT and higher values of WIP, the output performance of the gantry crane increases, which leads, however, to the increase of the mean throughput time of crane orders (see Figure 7).

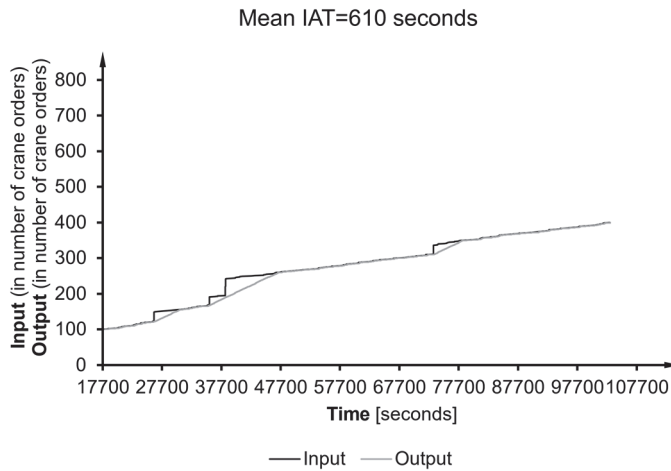


Figure 6: Throughput diagram of the gantry crane (lower load scenario)

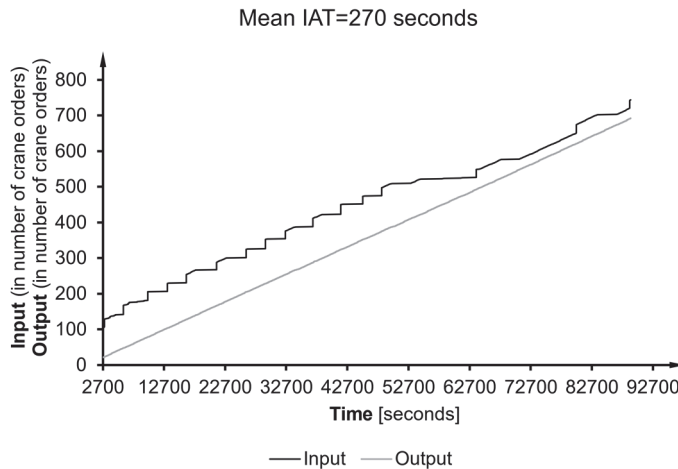


Figure 7: Throughput diagram of the gantry crane (higher load scenario)

6 Conclusion and Outlook

The paper presents a novel approach to create LOC and throughput diagrams for analysing objective conflicts at intermodal terminals. For this purpose, an adaptable simulation model has been used. The presented approach supports the illustration and quantification of logistics objective conflicts using the above-mentioned logistic models based on the consideration of crane orders. The model output allows further potential analysis, e.g. of a vehicle throughput performance. Future research may include more extensive representations of the storage area including strategies in the yard, the representation of realistic relationships between deliveries and pick-ups (import and export loading units), and the possibility of representing direct

transshipments. In addition, the realistic scenarios should be investigated based on LOC, including the derivation of corresponding approximation equations.

References

- Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch Belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Düsseldorf: VDI-Z 1984.
- Busse, T.D.: Modellbasierte Bewertung der Belastungstreuung auf das logistische Systemverhalten. Garbsen: PZH-Verlag 2013.
- Colombaroni, C.; Fusco, G.; Isaenko, N.; Quadrioglio, L.: Optimization of container operations at inland intermodal terminals. In: 2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Naples (Italy), 2017, pp. 69-74.
- Clausen, U.; Kaffka, J.: Entwicklung von Prioritätsregeln für Umschlagvorgänge in Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Eds.): Simulation in Produktion und Logistik. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2013, pp. 293-303.
- Egli, J.: Transportkennlinien: ein Ansatz zur Analyse von Materialflusssystemen. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2002.
- Engehausen, F.: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien. Hamburg: Technische Universität Hamburg 2021.
- Guo, P.; Cheng, W.; Wang, Y.; Boysen, N.: Gantry crane scheduling in intermodal rail-road container terminals. *International Journal of Production Research* 56 (2018) 16, pp. 5419–5436.
- Heinold, A.; Meisel, F.: Emission oriented vs. time oriented routing in the European intermodal rail/road freight transportation network. In: Bierwirth, C.; Kirschstein, T.; Sackmann, D. (Eds.): *Logistics management*. Cham: Springer 2019, pp. 188–202.
- Krüger, S.; Grafelmann, M.; Jahn, C.: Digital transformation of inland terminals. In: Shafik, M. (Ed.): *Advances in Intelligent Traffic and Transportation Systems*. Amsterdam: IOS Press 2023, pp. 93–103.
- Kuhlmann, A.S.: Konstruktion und Implementierung eines Optimierungsmodells für den Kombinierten Güterverkehr. Wiesbaden: Springer Gabler 2013.
- Lödding, H.: *Handbook of manufacturing control*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2013.
- Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Fundamentals of production logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009.
- Pinto, J.T.; Mistage, O.; Bilotta, P.; Helmers, E.: Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development* 25 (2018), pp. 100–110.
- Seitz, K.-F.: Modellierung von Transportprozessen in Lieferketten. Garbsen: PZH-Verlag 2016.
- Trzyna, D.: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion. Hamburg: Technische Universität Hamburg 2015.
- Winter, M.; Schoop, B.; Lödding, H.: Produktionskennlinien mit Belastungsflexibilität. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 11, pp. 762–765.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Generic Simulation Model for Less-Than-Truckload Terminals Based on Requirements of SMEs

Generisches Simulationsmodell für Stückgutspeditionsanlagen auf Basis der Anforderungen von KMUs

Maximilian Mowe, Lasse Jurgeleit, Maximilian Kiefer,
Christin Schumacher, Uwe Clausen
Institute of Transport Logistics / TU Dortmund University, Dortmund (Germany),
maximilian.mowe@tu-dortmund.de, lasse.jurgeleit@tu-dortmund.de,
maximilian.kiefer@tu-dortmund.de,
christin.schumacher@tu-dortmund.de, uwe.clausen@tu-dortmund.de

Abstract: Simulation can be used to plan and optimize less-than-truckload (LTL) terminals. To develop simulation models, specific expertise in this field is needed, which often requires high financial investments for acquisition of this knowledge. Due to limited financial resources, SMEs are often incapable to get to this expertise. The objective of the paper is to develop a generic model for LTL terminal planning that can be used without simulation expertise and that can be adapted to individual SME layouts. Therefore, based on focus group interviews with SMEs, a catalog of requirements is developed, including input variables and design criteria. Key performance indicators (KPIs) are defined to evaluate the results. A feasibility study for implementing a generic model based on the identified requirements is then performed. The implementation is done by modeling the I-layout of an LTL terminal.

1 Introduction

Layout planning for new less-than-truckload (LTL) terminals is often structured as a sequential process based on factory planning techniques that do not take into account dynamics such as daily variations in shipment volume or daily variations in functional areas to analyze which layout and truck loading concepts should be selected (Schenk and Wirth, 2004). A simulation-based approach can capture these dynamics. By building multiple variants of simulation models with different layout variants of LTL terminals, it is possible to consider dynamics in the design process (Chmielewski, 2007). However, applying simulation techniques requires expertise often only acquired through financial investment. Because the investment exceeds their financial resources, small and medium-sized enterprises (SMEs) often cannot afford this expertise (Schenk and Wirth, 2004).

The paper's objective is to collect requirements from SMEs for developing a generic simulation tool for modeling processes in LTL terminals. It is understood to be a tool that automatically converts user input into an executable model. The generic tool should be usable without simulation expertise and fit individual SME layouts and other business conditions. In this paper, we build a generic simulation model for the I-layout including first selected requirements of our catalog.

Therefore, the approach is organized as follows. Section 2 overviews the research findings on simulation experiments in SMEs, LTL terminals, and first studies on generic simulation models. Section 3 presents and analyzes the focus group interviews conducted to find the influencing parameters for our generic model of an LTL terminal with an I-layout. A catalog of requirements is developed, including input variables and design criteria. Key performance indicators (KPIs) are defined to evaluate the results. Section 4 describes the simulation architecture and used modules of AnyLogic 8.8. A first simulation model is then created. This model will validate how a universal simulation tool can be developed based on the requirements. The section also presents a series of experiments to test our methodology and analyzes the results obtained. Finally, Section 5 summarizes the main findings of this study and outlines a future research perspective.

2 Literature Review

Wiese (2018) found that 85,56 % of SMEs had not used simulation experiments before. The implementation barrier due to initial resources and short-term costs are reasons analyzed. Reviewing the literature on simulation models for SMEs we identify papers that include value stream analysis and material flow simulations only for specific use cases in SMEs (Kumar et al., 2016; Suhadak et al., 2015; Teerasoponpong and Sopadang, 2021). These simulations were conducted in collaboration with external simulation service providers due to the lack of knowledge in SMEs. For example, Kumar et al. (2016) investigate a layout analysis in a manufacturing SME using simulation software. Also, Suhadak et al. (2015) analyze different layout variants using simulation and value stream analysis for a production system of an SME in the food industry.

In the field of LTL terminals, Poeting et al. (2017) and Clausen et al. (2017) present frameworks that combine heuristic algorithms and Mixed-Integer Programming models with discrete event simulation to provide robust solutions to the loading and unloading decision problems in parcel transshipment terminals. Detailed inferences on the real system behavior are analyzed by testing the mathematical solutions in simulation experiments. Clausen and Goedicke (2012) develop a simulation model to compare yard strategies in LTL terminals concerning their effects on performance aspects of internal sorting operations, which benefit from constantly high input rates. In the approaches presented so far, the simulation models for SMEs are built manually.

There are also initial approaches that automatically generate simulation models. Their focus is mainly on manufacturing. Aggogeri et al. (2015) propose a generic simulation model for modeling and evaluating SME manufacturing processes. Using a tree structure that exploits similarities between different categories of manufacturing systems, in the first step, they categorize the systems to realize a model adapted to the specific needs of the user's application cases. In the second step, they also support the

data collection process for simulation by a web application. Mages et al. (2022) provide an approach for user-configurable simulation models for manufacturing processes. They define simulation building blocks such as storage towers and different types of machines as components. Using a graphical user interface (GUI), the number of storage towers and the number and types of machines can be adjusted, and the resulting model can be synthesized. In this way, multiple simulation models can be built using the GUI by varying the numbers, allowing layouts to be compared quickly. Mestiri et al. (2021) defined a generic model representing inbound transportation systems. All identified use cases differ from the objective mentioned above of developing a generic simulation model for the I-layout of LTL terminals.

3 Focus Group Interviews

This study used a focus group interview to gather data from SMEs regarding the attributes of a simulation tool that could assist SMEs in planning LTL terminals. Focus group interviews aim to explore the perspectives and experiences of a group of individuals who share a common characteristic (Calder, 1977). In this case, the focus group interview allows a deeper understanding of the essential needs of SMEs when developing a simulation tool. Within the focus group interviews, participants share their experiences and ideas. Emerging group dynamics enable individuals to build upon each other's contributions in an interactive setting leading to detailed responses (Calder, 1977). These detailed insights are essential to understand the SMEs' perspectives to develop a simulation tool tailored to their needs.

In 2022, a focus group interview was conducted with six participants representing four distinct industry areas. However, all participants work with LTL terminals. The discussion focused on the identification of values associated with three categories of LTL terminal planning, namely: (1) input parameters, (2) design criteria, and (3) key performance indicators (KPIs). Therefore, the semi-structured discussion was split into four rounds. In the first three rounds, relevant deemed attributes for each category were determined. Afterward, the participants engaged in a final round to discuss the assigned attributes and explore interdisciplinary linkages between the represented industry areas. The result is the classification with depending attributes all participants can agree on, shown in Table 1.

According to the results of the Focus Group Interviews, the requirements catalog is built. The framework of the catalog is divided into three main categories, which are mentioned above, and their corresponding attributes. The first criterion, input parameter, is mainly determined by given resources in the LTL terminals and includes parameters that can be individually set and modified by the user before model generation. Thus, these input parameters provide a fundamental basis for mapping and analyzing various planning scenarios. The second category, design criteria, is used to define those characteristics that describe the infrastructural design of general LTL terminals and indicate the main components of the yard. During the development of the simulation environment, it is essential to consider these criteria to ensure the realistic representation of such terminals and to provide an opportunity for validation. Although the values for the design criteria cannot be determined directly by the user, they are influenced indirectly by the specified input parameters. The third category of the requirements catalog contains relevant key performance indicators for evaluating

the efficiency of LTL terminals. Thus, these parameters represent the main output of the simulation model and can be divided into various fields of content, such as utilization-related and economic indicators, as well as time-related and volume-related performance indicators. The complete catalog of requirements with the determined attributes of the three main categories is shown in Table 1.

Table 1: Requirements catalog for Simulation Models of LTL terminals

Input Parameters	Design Criteria	KPIs
• Loading strategy	• Capacity of yard area	• Carbon footprint
• Number of forklifts	• Layout-forms	• Cycle time of shipment
• Number of docks	• Material flow	• Cycle time of forklifts
• Number of workers	• Paths for vehicles	• Distance traveled
• Performance forklifts	• Pick-up-area	• Handling volume
• Processing time	• Storage area	• Sales volume
• Shipment volume		• System load
• Truck capacity		• Utilization: forklifts
		• Utilization: docks
		• Utilization: storage areas
		• Utilization workers

4 Simulation

The structure for a generic simulation tool derived from the requirements catalog is shown in Figure 1. In order to enable a low-threshold use of the simulation tool, two layers arise. The first layer of SMEs must meet the level of user knowledge. This layer influences the second layer, the simulation layer, directly. Simulation experts are omitted from the transfer between these levels. Thus, the simulation expert only affects the tool during development but not during use. Contrary to this, the expert connects the user and the simulation in classical simulation studies. The presented structure leads to a simulation layer, which must automatically adapt to user input while ensuring executability.

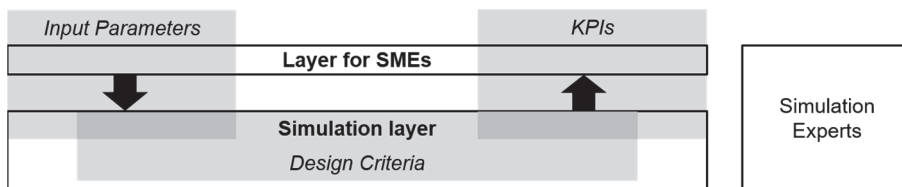


Figure 1: Structure for the generic simulation tool

The development of the generic simulation model for the I-layout of an LTL terminal is based on this structure, using the catalog of requirements defined above and the process model of VDI Guideline 3633 Sheet 1, because this approach has considerable relevance in the simulation of systems in materials handling, logistics and production

in the German-speaking area. It defines the procedure of a simulation study with all relevant phases, starting with the target description, through verification and validation, and finally to the simulation results (Rabe et al., 2008; VDI 3633). The I-layout represents one of the basic shapes of LTL terminals and is characterized by a rectangular design that can easily extend its length by adding further docks. Thus, this type is one of the most preferred basic shapes in practice and will be investigated in this paper (Chmielewski, 2007). The structure of this layout type and the associated modification of the lengths is demonstrated in Figure 2.

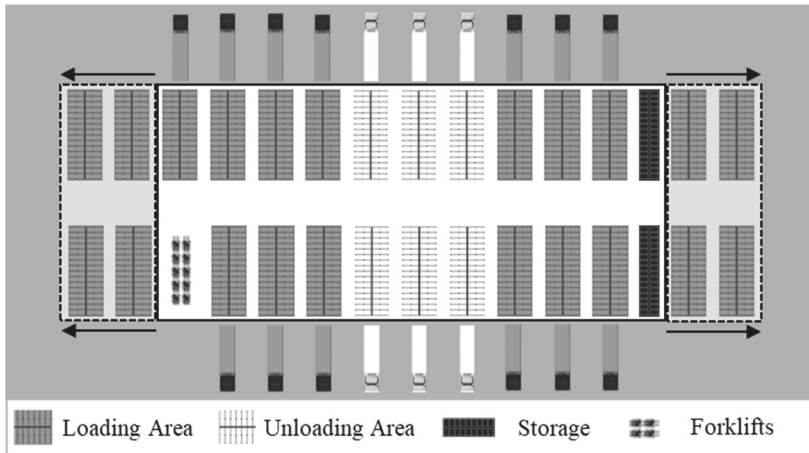


Figure 2: Structure of the I-Layout based on Anylogic

The software AnyLogic 8.8 is used to develop the simulation model, which combines three different modeling methods and examines various levels of abstraction in a single model. The developed simulation model uses discrete and agent-based modeling and includes several agents, which map the process of an LTL terminal by interaction with each other. In addition, the user-specific terminal design gets determined through an input before the simulation run. Using a graphical user interface (Figure 3), the user defines a selection of various input parameters from the requirements catalog. The framework of this simulation tool allows to configure the number of workers, respectively forklifts, the number of docks for loading and unloading, and processing times according to the user's needs. These parameters will be set using a slider or entering concrete values.

After setting the parameters, the simulation model will be generated automatically by considering all defined design criteria of the catalog to ensure the realistic representation of the LTL terminal. The central instance of the simulation model is the agent "Main". The terminal is modeled and presented in two and three dimensions within the main agent based on the user input. Furthermore, the main agent contains the logical process flow defined by the simulation expert. The user cannot change the logic, which remains unchanged regardless of the terminal size. Lastly, the statistics of the simulation run are shown in the main agent. The selection of the statistics displayed corresponds to the KPIs of the requirements catalog. In addition to the main

agent, five further agents will be generated and injected into the process flow, except for the docks. The agent Dock is only used to generate the terminal layout.

- Unloading Truck
- Loading Truck
- Forklift
- Dock
- Pallet

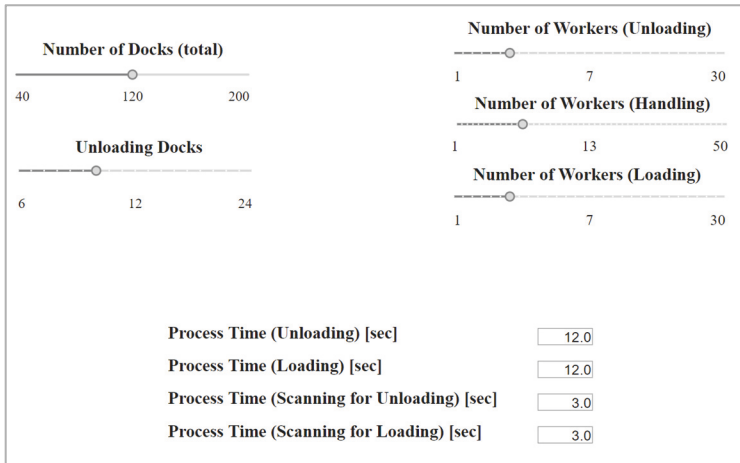


Figure 3: Input screen for defining the parameters

The simulation model's logic covers LTL terminal's entire handling processes. They are divided into various sub-processes, linked to each other directly or by using exit and enter blocks (Figure 4). These are represented in AnyLogic by the sequential order of particular blocks, which are passed through by the agents and perform defined actions. The system boundaries of the simulation model are defined by the arriving unloading trucks and the departing loading trucks.

The first part of the process flow includes the arrival and departure of the unloading trucks. For this purpose, the respective agents are injected into the simulation model according to a triangular distribution based on the vehicle arrival distribution at LTL terminals by Chmielewski (2007). In addition, the generated agents will be assigned to a corresponding unloading dock. The arrival procedure is linked to the sub-process "Unloading Process", where the agent "Pallet" is created and symbolizes the incoming shipments. In the next step, these pallets are transported to the unloading areas using the previously defined agent "Forklift". Afterward, based on real shipment data of a forwarding company, a triangular distribution is used to determine the target loading area of the shipments and their transport is executed by a handling forklift. In case of an already occupied loading area or if the loading truck has no more available capacities, a case distinction is made, which results in storing the pallets in the intermediate storage. These processes are represented by the two sequences "Store Process (if no free slot in loading storage)" and "Store Process (if no loading capacity in truck)". Finally, the pallets stored in the loading area will be transferred to the

"Loading Truck" agent. This is mapped using the two directly connected sub-processes, "Loading process" and "Arrival and Departure Loading Truck". The Loading Truck agents are injected into the process flow based on a defined schedule and are allocated to a corresponding loading dock. After a successful load, the loading truck agents will leave the model via the defined sink. In this context, the transport processes of the pallets are performed by using the forklifts in combination with the available number of workers for loading defined at the beginning.

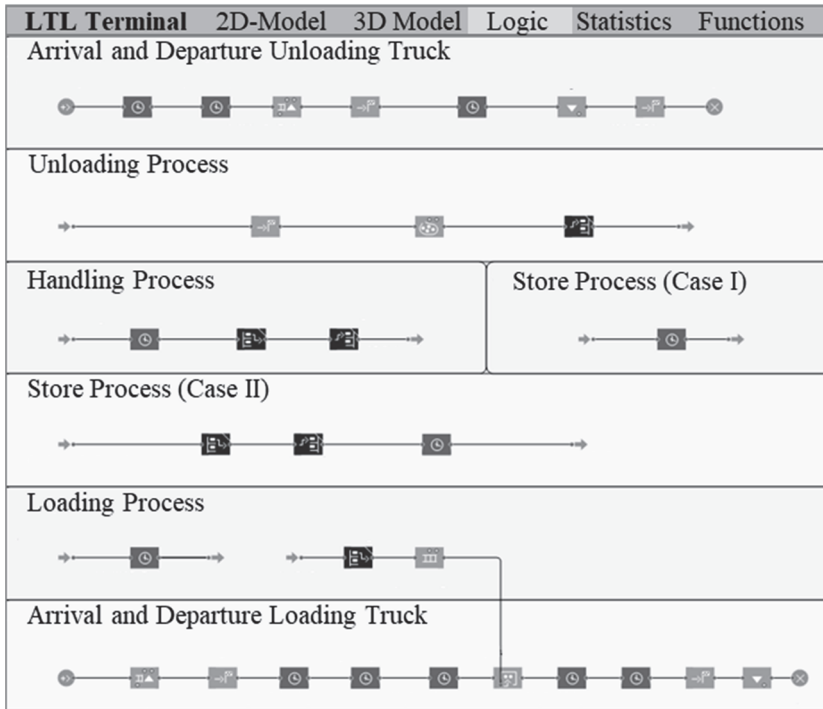


Figure 4: Process Flow of the Simulation Model

For validation of the generic simulation model, several simulation runs with different parameter configurations are performed. On the one hand, this will demonstrate the possibility of an individual configuration and investigation of the I-layout of an LTL terminal. On the other hand, it shows that the mapped processes correspond to practice and that the simulation model provides realistic results. To cover the entire possible setting range, the number of total docks is increased in steps of 40 up to the maximum value of 200 docks. The share of unloading docks is set at 10% continuously. In addition, the processing times for loading and unloading are set at 12 seconds, and the time for two scanning processes is defined as 3 seconds per shipment. The number of employees assigned to the corresponding sub-processes is determined based on previous investigations and can be taken from Table 2. Here, the number of employees must be at least enough to handle the volume of shipments until the end of the respective shifts and to ensure that the simulation run is not interrupted by capacity bottlenecks.

Table 2: Parameter configurations of the simulation runs

Variant	Number of Docks (total)	Unloading Docks	Number of Workers		
			Unloading	Handling	Loading
1	40	4	3	4	3
2	80	8	5	8	5
3	120	12	7	13	7
4	160	16	8	19	8
5	200	20	10	26	10

The first step to verify the possibility of a generic model is to determine if the shipments rise with the increased number of docks. For this purpose, the number of loading docks corresponds to the number of arriving trucks with shipments. In this context, the trucks are injected according to the distribution explained above and their capacity is defined based on real data of a forwarding company. The data preparation shows that all trucks in long-distance traffic have a capacity of about 32 spaces for euro pallets. However, in local traffic, only 33 percent of all trucks have these characteristics, leaving the remaining trucks with a capacity of up to 17 pallets, depending on the type of vehicle used (Deymann, 2011).

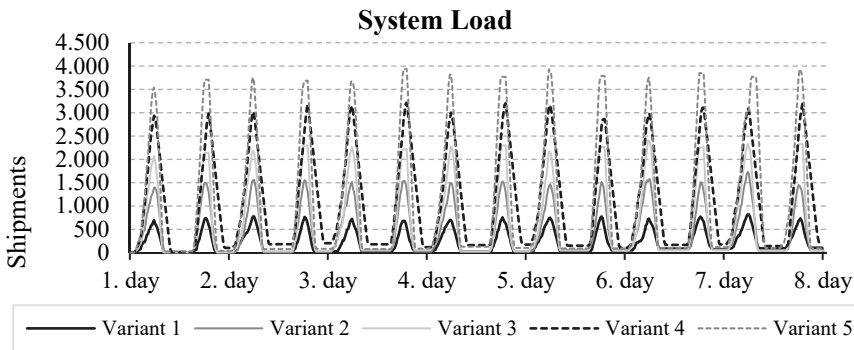


Figure 5: System Load of LTL terminals

Figure 5 shows the system load of the terminal depending on the number of docks and represents the absolute value of shipments per day. Further extensions of the model should include the user’s specific adaption of shipment volume based on individual circumstances. In addition, the distance traveled was evaluated depending on the number of loading docks. Figure 6 shows that the distance the unloaders cover rises as the size of the LTL terminal increases. This progression occurs because unloaders drive exclusively to the middle docks for unloading the trucks. As the number of docks increases, more unloading trucks arrive at the docks leading to a rise in the distance traveled. Contrary, unloaders can drive directly to the next truck after completing the unloading process of another truck more often at this point. On the other hand, the distance traveled by loaders increases proportionally to the number of docks. In the loading process, the empty run, i.e., the distance to the truck to be loaded, becomes longer as the number of docks increases. However, at each dock, the distances for

loading are independent of the number of docks since the worker only travels between the storage area and the truck. Since the loading and unloading processes are similar, the course of the distances in Figure 6 is also similar. This differs from the distance covered in the handling process. In this process, the employees must pick up a pallet from the unloading area in the middle of the plant, bring it to the respective loading gate, and drive back without a pallet. As the number of docks increases, the distance between these areas and the distance covered in the handling process rises disproportionately and significantly exceeds the traveled distance of the loading and unloading processes.

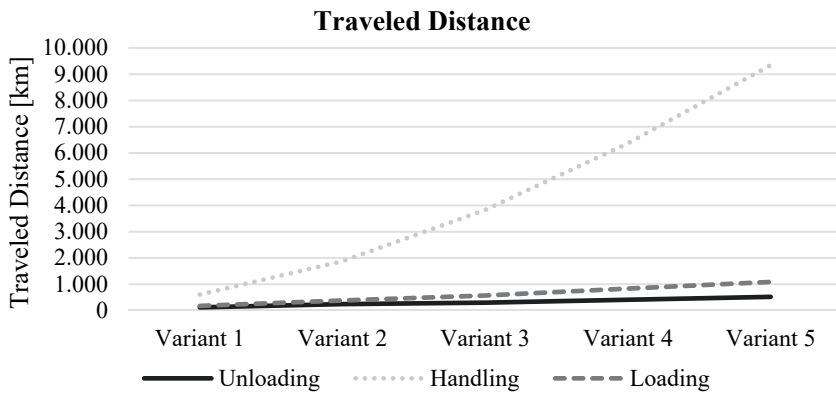


Figure 6: Mean value of traveled distance in km

In addition to the key performance indicators presented, the simulation model can determine the utilization of the forklifts, docks, storage areas, and workers. Moreover, the cycle times of forklifts and shipments can be identified, as well as handling volume. Based on this model, a large part of the requirements for a generic simulation model determined in the focus group interview can be fulfilled. Following this research, a tool that supports other forms besides the I-layout and determines all KPIs has to be developed in the next step.

5 Conclusion

In this paper, an automatic generation of discrete event simulation models for LTL terminals has been developed. We found that using a generic simulation tool can overcome the barriers of incorporating simulation into SME planning processes. With the help of focus group interviews, a catalog of requirements for SME planning processes was built and divided into input parameters, design criteria, and KPIs. For this feasibility study, a first generic model was realized with a selection of the input parameters for the I-layout of LTL terminals. The evaluations show that it can be helpful to compare different layouts with dynamic inputs, since, for example, distances traveled can vary considerably which can influence the efficiency and carbon footprint of the terminal. Further approaches should develop a generic tool covering the requirements catalog in its entirety and enabling the modeling of any terminal layout beyond the I-layout.

References

- Aggogeri, F.; Faglia, R.; Mazzola, M.; Merlo, A.: Automating the Simulation of SME Processes through a Discrete Event Parametric Model. *International Journal of Engineering Business Management* 7 (2015), pp. 4.
- Calder, B.J.: Focus Groups and the Nature of Qualitative Marketing Research. *Journal of Marketing Research* 14 (1977) 3, pp. 353–364.
- Chmielewski, A.: Entwicklung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutpeditionsanlagen. Unter Mitarbeit von Technische Universität Dortmund, 2007,
- Clausen, U.; Diekmann, D.; Pötting, M.; Schumacher, C.: Operating parcel transshipment terminals: a combined simulation and optimization approach. *Journal of Simulation* 11 (2017) 1, pp. 2–10.
- Clausen, U.; Goedicke, I.: Simulation of yard operations and management in transshipment terminals. In: *Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, Berlin, Germany, 09.12.2012 - 12.12.2012, 2012, pp. 1–10.
- Deymann, S.: Entwicklung eines Vorgehens zur Groblayoutplanung von Stückgutpeditionsanlagen. Dortmund: Verl. Praxiswissen 2011.
- Kumar, V.; Verma, P.; Onkar, Singh, S.P.; Katiyar, J.: Facility and Process Layout Analysis of an SME using Simulation: A Case Study of a Manufacturing. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, 8.-10. März, 2016,
- Mages, A.; Mieth, C.; Hetzler, J.; Kallat, F.; Rehof, J.; Riest, C.; Schäfer, T.: Automatic Component-Based Synthesis of User-Configured Manufacturing Simulation Models. In: *WSC 2022*, pp. 1841–1852.
- Mestiri, S.; Jamil, J.; Fottner, J.: A Flexible and Generic Simulation Model for in-Bound Transport Systems. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Modeling & Applied Simulation*, 15-17 September 2021, 2021, pp. 85–90.
- Poeting, M.; Rau, J.; Clausen, U.; Schumacher, C.: A combined simulation optimization framework to improve operations in parcel logistics. In: Chan, W.Kin; D'Ambrogio, A.; Zacharewicz, G.; Mustafee, N.; Wainer, G.; Page, E.H. (Hrsg.): *WSC'17, Las Vegas, NV, 12/3/2017 - 12/6/2017*, 2017, pp. 3483–3494.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Schenk, M.; Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Berlin u.a.: Springer 2004.
- Suhadak, N.S.; Amit, N.; Ali, M.N.: Facility Layout for SME Food Industry via Value Stream Mapping and Simulation. *Procedia Economics and Finance* 31 (2015), pp. 797–802.
- Teerasoponpong, S.; Sopadang, A.: A simulation-optimization approach for adaptive manufacturing capacity planning in small and medium-sized enterprises. *Expert Systems with Applications* 168 (2021), pp. 114451.
- VDI Association of German Engineers e.V. *VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Dezember 2014.
- Wiese, J.: *Simulationen in KMU : Eine erste Bestandsaufnahme* (2018).

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Datenbeschaffung und -aufbereitung im Kontext einer Lkw-Shuttle-Simulation zwischen Produktionswerk und Logistikzentrum

Data Acquisition and Preparation in the Context of a Truck Shuttle Simulation between Production Plant and Logistics Centre

Marec Kexel, AcuroSim GmbH, Wiesbaden (Germany), kexel@acurosim.com
Walter Wincheringer, Digitales Produktionslabor der Hochschule Koblenz, Koblenz (Germany), wincheringer@hs-koblenz.de

Abstract: The present text reports on data acquisition and preparation in a simulation for evaluating a planned truck shuttle operation from a production plant to a logistic centre. Special aspects include the development of time intervals for the provision of finished goods that must be transported to the logistic centre by truck. Furthermore, the text describes how the travel time between the production facility and the logistic centre can be determined using various approaches. Finally, the results demonstrate the impacts that a more detailed consideration of the aforementioned aspects can have, particularly with respect to dynamic truck allocation and production planning at the production plant.

1 Einleitung

Die manuelle Be- und Entladung mittels Gabelstapler ist mit erheblichen Lkw-Standzeiten, einem Staplerbetrieb und entsprechenden Kosten verbunden. Daher kommen vermehrt automatische Verladesysteme (engl.: Automated Truck Loading Systems, ATLS) für regelmäßige Transportstrecken zum Einsatz (Günthner und Freudl, 1999b).

Dies gilt insbesondere für kurze Transportstrecken, da hierbei der Zeitanteil für die Be- und Entladung im Verhältnis zur Fahrzeit größer ist und daher eine automatische Be- und Entladung ein erhebliches Einsparpotenzial bietet (Meyer et al., 2008). Ebenfalls eignen sich automatische Verladesysteme bei einem entsprechend hohen Verladeaufkommen (Freudl, 2001). Dabei kann je nach ausgewähltem Verladesystem die Verladezeit von ca. 40 Minuten, bei einer manuellen Be- und Entladung, auf jeweils ca. 3 Minuten bei einer automatischen Verladung reduziert werden (Bioly et al., 2014).

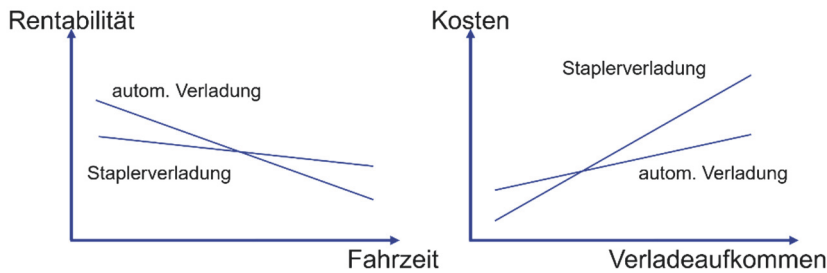


Abbildung 1: Rentabilität vs. Fahrzeit sowie Kosten vs. Verladeaufkommen (Günthner und Freudl, 1999a)

Neben den Vorteilen einer minimierten Verladezeit, erhöhen ATLS die Arbeitssicherheit und können unmittelbar an entsprechende Lagerverwaltungssysteme angebunden werden. Darüber hinaus bieten ATLS die Möglichkeit der Verladung außerhalb der regulären Arbeitszeiten, da kein Staplerpersonal benötigt wird (Sochaczewski, 2010).

Sowohl die Installation der Be- und Entladeeinrichtungen im Produktionswerk und im Logistikzentrum als auch die Ausstattung der Lkw-Auflieger ist mit erheblichen Investitionen verbunden (Penno et al., 2020).

Daher ist bei der Planung die Anzahl der notwendigen Be- und Entladeeinrichtungen als auch die Anzahl der Lkw-Auflieger möglichst exakt zu bestimmen. Eine statische Betrachtung mit durchschnittlichen Fahrzeiten und durchschnittlichen Be- und Entlademengen je Zeiteinheit ist jedoch nicht ausreichend. Es bedarf einer dynamischen Betrachtung über die Zeit.

2 Das System

Vor dieser Herausforderung steht ebenfalls ein Unternehmen aus der Getränkebranche. In Zusammenarbeit mit der AcuroSim soll ein Transportkonzept (inkl. automatischer Verladesysteme) von der Produktionsstätte bis zum ca. 20 km entfernten Logistikzentrum erarbeitet und optimiert werden. Um diese Fragen ebenfalls unter Berücksichtigung der dynamischen Aspekte zu untersuchen, insbesondere aufgrund des Einflusses von Verkehr oder der unterschiedlichen Produktionspläne, entschied sich das Unternehmen für eine Simulation.

In Abbildung 2 ist das zu modellierende System inkl. der entsprechenden Systemgrenzen dargestellt. So wird der Prozess von der Bereitstellung der Fertigware über den Be- und Entladevorgang sowie der Transport abgebildet. Eine Abbildung der jeweiligen Produktions- und detaillierten Einlagerungsprozesse erfolgt nicht.

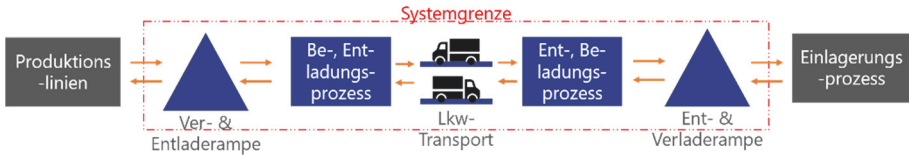


Abbildung 2: Systemgrenzen

Insgesamt teilt sich der Produktionsbetrieb in zwei Produktionsbereiche auf. In Produktionsbereich 1 befinden sich insgesamt drei Produktionslinien, welche transportbereite Fertigware produzieren. Die Fertigware wird hierbei auf Europaletten (EPAL) bereitgestellt.

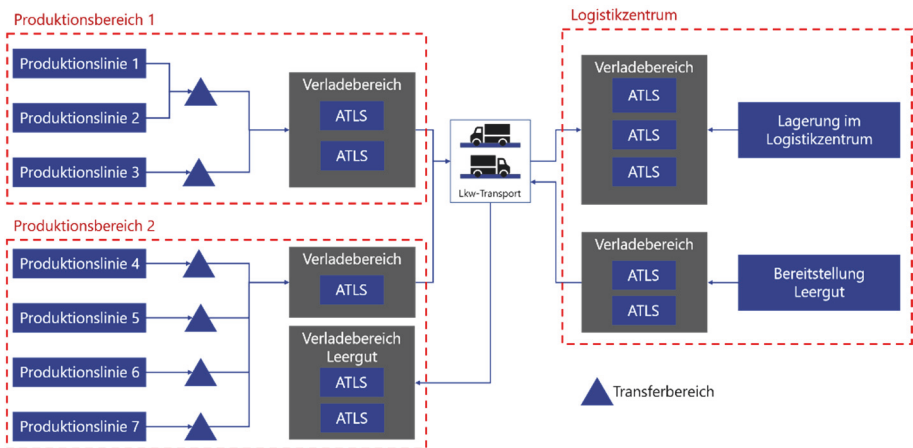


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung des Materialflusses

Für diesen Bereich stehen zwei automatische Verladesyteme zur Verfügung. Die entsprechenden Produktionslinien sind mittels Fördertechnik (Stetigförderer) an die jeweiligen automatischen Verladesyteme angebunden. Produktionslinie 1 und 2 befüllen hierbei das erste ATLS während Produktionslinie 3 das zweite ATLS versorgt. Die installierte Produktionsleistung der Linie 3 ist etwa doppelt so hoch wie die der Linie 1 bzw. 2.

Im Produktionsbereich 2 befinden sich in Summe vier weitere Produktionslinien, jedoch mit einer deutlich geringeren Produktionsleistung (EPAL/h) im Vergleich zu den Linien 1-3. Für die Verladung der Fertigware auf den entsprechenden Lkw steht ein automatisches Verladesyteme zur Verfügung. Die Produktionslinien im Produktionsbereich 2 (Produktionslinie 4 bis 7) sind mit dem automatischen Verladesyteme verbunden. Zusätzlich besteht hier die Möglichkeit einer manuellen Entnahme und Zuführung von EPAL durch einen Staplerfahrer. Dies ist im Produktionsbereich 1 nicht vorgesehen. Zusätzlich stehen im Produktionsbereich 2

zwei weitere automatische Verladestysteme zur Verfügung. Diese sind ausschließlich für die Anlieferung von Leergut vorgesehen.

Für den Transport zwischen Produktionsbetrieb und Logistikzentrum stehen drei potenzielle Routen zur Auswahl. Diese unterscheiden sich in ihren Längen und Fahrzeiten sowie in der Verkehrsbelastung. Im Logistikzentrum angekommen, stehen drei automatische Verladestysteme für die Annahme der Fertigware zur Verfügung. Zwei ATLS sind für die Annahme der Fertigwaren aus Produktionsbereich 1 vorgesehen, während das dritte ATLS für die Annahme der Fertigware aus Produktionsbereich 2 vorgesehen ist.

Darüber hinaus sind zwei zusätzliche automatische Verladestysteme im Logistikzentrum vorgesehen, welche das benötigte Leergut (unsortiert) für die Versorgung des Produktionsbereichs 2 bereitstellen. In Abhängigkeit des Bedarfs im Produktionsbetrieb kann entsprechendes Leergut aufgenommen und zum Produktionsbetrieb transportiert werden.

3 Problemstellung / Herausforderung

Insgesamt werden mehrere hundert unterschiedliche Produkte auf den Produktionslinien hergestellt, verpackt und anschließend palettiert.

Die Durchführung der Simulationsstudie zur Absicherung des Transportkonzeptes orientiert sich an der Vorgehensweise der VDI 3633. So wurde im Anschluss an die Zielbeschreibung und die Aufgabendefinition zunächst das geplante System analysiert und in einem Konzeptmodell beschrieben. Darauf folgen die Formalisierung und Implementierung. Parallel dazu erfolgte die Erfassung und Aufbereitung der erforderlichen Daten sowie eine Verifizierung und Validierung (V&V) der jeweiligen Phasenergebnisse (VDI 3633 Blatt 1, 2014).

Insbesondere die Beschaffung der Daten in der notwendigen Qualität erwies sich als ein komplexer und zeitaufwendiger Prozess. Dies gilt insbesondere für die Daten, welche eine signifikante Auswirkung auf die Simulationsergebnisse haben.

Einen signifikanten Einfluss hat u.a. der Zeitraum, in dem Fertigware von der Produktionslinie für den Abtransport bereitgestellt wird. Diese Daten werden benötigt, um zu simulieren, wann die Kapazitätsgrenzen der Puffer zwischen den Produktionslinien und den Verladestystemen erreicht sind und ein automatisches Abschalten der Produktionslinien, aufgrund des Rückstaus, erforderlich ist.

Ebenfalls hat die Transportroute und damit einhergehend die Fahrzeit der Lkw einen relevanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Diese Zeit kann je nach ausgewählter Route, Wochentag und Uhrzeit schwanken. Dementsprechend ist hier ebenfalls eine entsprechende aussagekräftige Datengrundlage erforderlich.

Neben der Beschaffung der erforderlichen Daten sind weitere Restriktionen im Simulationsmodell zu berücksichtigen.

So ist die Lkw-Kapazität für die Anzahl an Paletten auf 30 Stück begrenzt. Diese werden im Lkw auf 3 Reihen à 10 Paletten angeordnet, wobei die Beladung der 3 Reihen stets parallel mit einem Artikel von einer Produktionslinie erfolgt.

Zusätzlich ist bei der Verladung drauf zu achten, dass die maximal zulässige Zuladung von 22,5 t pro Lkw nicht überschritten werden darf. Bei der Vielfalt an unterschiedlichen Produkten variiert das Gewicht je Palette zwischen 600 kg bis 1.000

kg. So kann je nach produziertem Produkt die maximale Zuladung bereits nach 21 Paletten (Worst-Case) überschritten werden. Theoretisch ist dabei die Aufnahme einer weiteren Palette aufgrund der Zuladung von 22,5t weiterhin zulässig, jedoch ist dies aufgrund der oben beschriebenen Restriktion der Ladungssicherung nicht gestattet.

Der Produktionsplan und die zu produzierenden Artikel haben ebenfalls Einfluss auf die Leistung der unterschiedlichen Produktionslinien. So variiert die Leistung zwischen 8 EPAL und 40 EPAL pro Stunde.

4 Ermittlung der Daten

Im Bereich der Bereitstellung von Fertigware ist lediglich die Spitzenleistung der jeweiligen Produktionslinien bekannt. Aufgrund von technischen Störungen, Rüstzeiten, Reinigungszeiten etc. weichen die Realdaten von diesen theoretischen Spitzenleistungen zum Teil erheblich ab. Überdies beeinflussen unterschiedliche Produkte, Verpackungsformen und Produktionspläne die Durchsatzleistung der jeweiligen Produktionslinien. Somit bietet die Abbildung der Spitzenleistung im Simulationsmodell keine hinreichende Datengrundlage.

Um die erforderlichen Daten zu erhalten, besteht die Möglichkeit, eine manuelle Zeitaufnahme pro Produktionslinie und Produkt durchzuführen (Gutenschwager et al., 2017). Diese ist jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden. Alternativ besteht die Möglichkeit, eine automatische Zählleinrichtung temporär zu installieren. Dies ist mit entsprechenden Kosten verbunden und ergibt aufgrund des geringen Aufzeichnungszeitraums ebenso keine ausreichende Datengenauigkeit.

In der Praxis werden in bestimmten Anwendungsbereichen häufig aus unterschiedlichen Gründen (Energieverbrauch, Qualitätsaspekte, etc.) Daten erhoben und gespeichert, jedoch nicht weiterverwendet. Auch im Bereich der Palettierer an den Produktionslinien ist dies der Fall.

Am Ende der jeweiligen Produktionslinie wird jede Fertigwaren-Palette mit einem Paletten-Etikett und der Nummer der Versandeinheit, kurz NVE, versehen (Koether, 2012). Dies wird durch eine automatisierte Etiketten-Applikation angebracht. Während diesem Prozess werden u.a. Daten zu Artikel-Nr., Auftragsnummer, Chargennummer, Anzahl der Produkte, Gewicht pro Palette sowie ein entsprechender Zeitstempel erfasst und in einer Datenbank für die Rückverfolgung abgelegt. Mittels der erfassten Zeitstempel und der Unterscheidung je Artikel-Nr., können durch eine entsprechende Datenanalyse die Zeitintervalle für jedes Produkt ermitteln werden.

Hierzu sind bei 7 vorhandenen Produktionslinien und mehr als 200.000 Dateneinträgen pro Produktionslinie und Jahr über 2 Mio. Datensätze zu bereinigen und auszuwerten. Weiterhin sind diese Daten zu sinnvollen Produktfamilien zusammenzufassen.

Um die Daten in eine Verteilung für das entsprechende Ankunftsintervall der artikelspezifischen Paletten zu überführen, wurde die Datenaufbereitung automatisiert. Durch diese Vorgehensweise konnten realitätsnahe Ankunftsintervalle je Produkt im Simulationsmodell berücksichtigt werden.

Hierzu wurden zunächst die zeitliche Differenz je EPAL bei gleichem Artikel bestimmt. Die jeweiligen Intervalle wurden im Anschluss in entsprechende Produktfamilien untergliedert. Die Zuordnung zu den jeweiligen Produktfamilien wurde durch das Industrieunternehmen vorgegeben. Im nächsten Schritt wurden die

Zeitintervalle in ein Histogramm überführt und analysiert. Hierbei konnten zum Teil deutliche Unterschiede in den Zeitintervallen identifiziert werden. Dabei lagen die Zeitintervalle zwischen 1 Minute und 1,5 Tagen. Diese Unterschiede entstanden durch längere Stillstände der Produktionslinien oder manuellen Eingriffe. Gründe dafür sind u.a. Störungen, Wartungs-, Instandsetzungsmaßnahmen oder Reinigungstätigkeiten.

In Zusammenarbeit mit dem Industrieunternehmen wurden anschließend entsprechende Obergrenzen für die Histogramme in Abhängigkeit der Produktionsfamilie und Produktionslinie festgelegt. Diese beinhalten weiterhin den Einfluss entsprechender Kurzzeitstörungen, filtern jedoch den Einfluss größerer Störungen und Wartungen heraus.

Die finalen Verteilungen wurden anschließend in einem entsprechenden Dateiformat gespeichert und dem Simulationsmodell zur Verfügung gestellt. Neben den Zeitintervallen wurden ebenfalls die Paletten-Gewichte ausgewertet und den jeweiligen Produktfamilien zugewiesen, um diese ebenfalls im Simulationsmodell zu berücksichtigen.

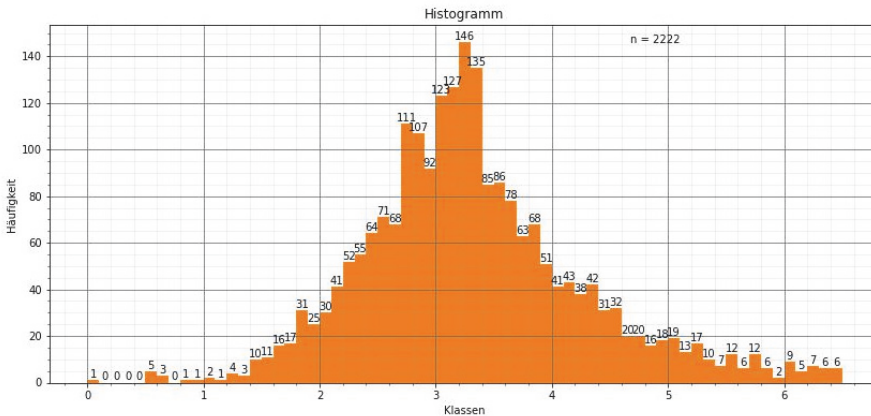


Abbildung 4: Aufbereitete Daten eines Produkts

Für die Fahrzeit der Lkw sind keine Daten vorhanden, da das Logistikzentrum noch in der Bauphase ist. Hier wurden für die Ermittlung der fehlenden Informationen zwei mögliche Methoden evaluiert:

Die erste Methode ist die Berechnung einer estimated time of arrival, kurz ETA. Dabei wird auf Basis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, des Wochentags, der Uhrzeit und der aktuellen Verkehrslage die voraussichtliche Ankunftszeit bestimmt. Durch die Nutzung von historischen Daten besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Transportzeiten für die jeweiligen Wochentage und Uhrzeiten zu evaluieren. Die Genauigkeit ist dabei abhängig von der Anzahl an verfügbaren Datensätzen und des genutzten Fahrzeugs (Pkw vs. Lkw). Weiterhin ist die Genauigkeit für längere Strecken wesentlich besser als für Kurzstrecken, da sich einzelne Stopps bei kurzen Fahrzeiten viel stärker auswirken als auf längeren Strecken. Für stark befahrene Strecken und Autobahnen, beispielsweise im Fernverkehr, sind ausreichend Daten

verfügbar. Für Land- oder Kreisstraßen fehlen diese häufig. Dadurch ist eine ETA-Berechnung für diese Routen nicht zielführend.

Aufgrund der ländlichen Region des Produktionswerks und des Logistikzentrums sowie der Nutzung von überwiegend Land- und Kreisstraßen bietet dieser Ansatz keine ausreichende Datenqualität für die Ermittlung der Fahrzeit. Weiterhin wird bei der Berechnung der ETA je nach Dienstleister nicht unterschieden, ob es sich bei dem betrachteten Fahrzeug um einen Pkw oder Lkw handelt.

Somit musste auf eine manuelle Zeiterfassung der Transportzeiten zurückgegriffen werden. Hierzu wurde definiert, ab wann die Zeitaufnahme startet und ab welchem Punkt sie beendet wird. Ebenfalls wurde die Uhrzeit, der Wochentag sowie sonstige Anmerkungen erfasst. Dies ist für jede Route mithilfe von GPS-Trackern, die im Lkw mitgeführt wurden, mehrfach durchgeführt worden.

Die dadurch gewonnenen Daten zeigten zum Teil erhebliche Zeitdifferenzen auf. Insbesondere langsame Kraftfahrzeuge, wie landwirtschaftliche Fahrzeuge, welche in Teilstrecken nicht überholt werden können, sorgen dafür, dass sich die durchschnittliche Transportzeit von ca. 20 Minuten pro Fahrt auf bis zu 30 Minuten, und mehr erhöht.

Um diese dynamischen Einflüsse ebenfalls in der Simulation zu berücksichtigen, ist eine Überführung der erfassten Fahrdaten in eine entsprechende Verteilung (pro Wochentag und Uhrzeit) erforderlich. Der Umfang der aufgezeichneten Daten war jedoch nicht ausreichend, um eine solche Verteilung abzuleiten. Lediglich die durchschnittliche Transportzeit wurde ermittelt und durch die empirische Erfahrung der Lkw-Fahrer bestätigt.

Um dennoch eine entsprechende Verteilung der Fahrzeiten ableiten zu können, wurde auf Erfahrungswerte der statistischen Schwankungen bei der ETA-Berechnung für Kurzstrecken (10 bis 30 km) zurückgegriffen (Hillen, 2021). Mit diesen Informationen wurde die Verteilung der Fahrzeit für die Simulation modelliert. In Abbildung 5 ist eine solche Verteilung für die Route 1 und die Tageszeit 12:00 Uhr abgebildet. Diese Verteilungen wurden abschließend ebenfalls mit den erfahrenen Lkw-Fahrern validiert und auf Plausibilität geprüft.

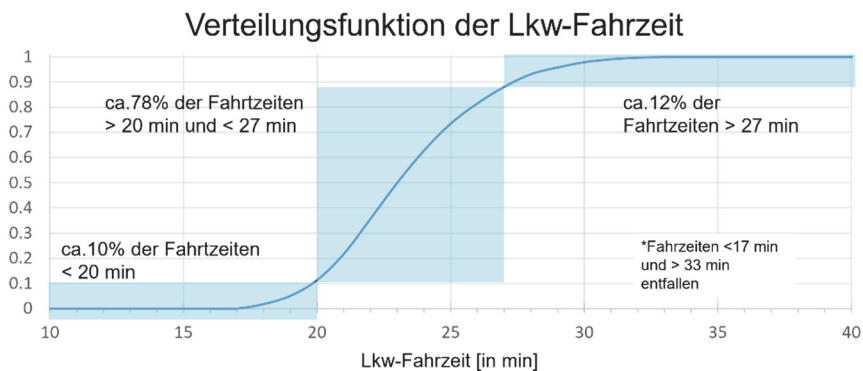


Abbildung 5: Verteilungsfunktion der Fahrzeit für Route 1 (12 Uhr)

5 Simulationsmodell

Die Abbildung des Simulationsmodells erfolgt in der Simulationssoftware WITNESS Horizon. Hierzu wurden die im Kapitel 2 beschriebenen Systembestandteile sowie die in Kapitel 3 erläuterten Restriktionen (Ladungssicherung und maximal zulässige Zuladung) abgebildet sowie verifiziert und validiert.

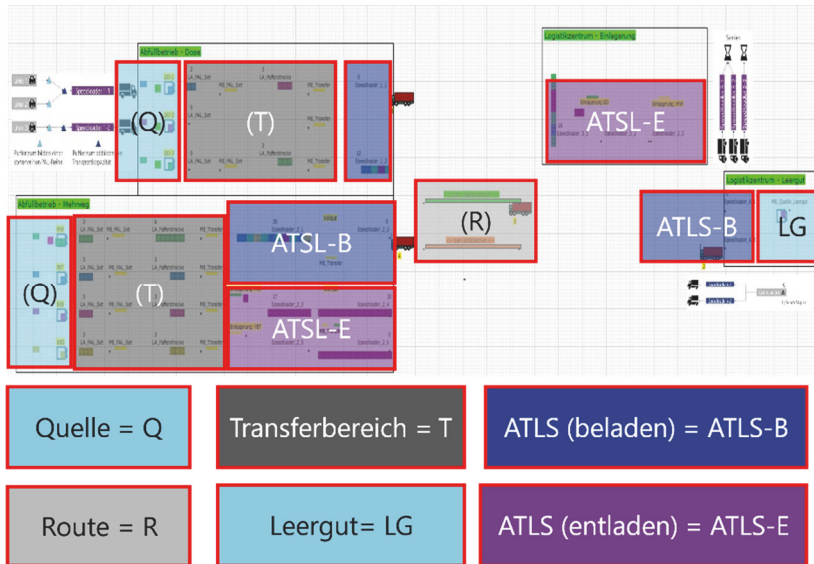


Abbildung 6: Übersicht über das Simulationsmodell

Die Produktionslinien sind im Simulationsmodell als entsprechende Quelle hinterlegt. Dabei kann pro Produktionslinie ein Produktionsplan inkl. Rüstzeiten und Reinigungsschichten hinterlegt werden. Die Zeit zur Generierung einer EPAL erfolgt produktspezifisch anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Histogramme.

Der Transferbereich bildet die kapazitiven Puffer zwischen den jeweiligen Produktionslinien und den automatischen Verladesystemen ab. Zusätzlich ist eine Mindestverweilzeit für diesen Bereich vorgesehen, sodass die entsprechenden Transportzeiten berücksichtigt werden. Eine Abbildung der Steuerungslogiken der Förderer sowie die Abbildung der jeweiligen Fördergeschwindigkeiten sind aufgrund des vernachlässigbaren Einflusses nicht erforderlich.

Anschließend an den Transferbereich erfolgt die simulative Abbildung der automatischen Verladesysteme. Der Bereich ATLS-B markiert die Systeme, welche zum Beladen eines Lkws genutzt werden. Der Bereiche ATLS-E kennzeichnet automatische Verladesysteme, welche für das Entladen eines Lkw vorgesehen sind. Ein automatisches Verladesystem, welches sowohl Be- als auch Entladevorgänge durchführt, ist aktuell nicht vorgesehen. Mit den abgebildeten Verladesystemen können bis zu 30 EPAL in ca. 3 Minuten verladen werden.

Bei den automatischen Verladesystemen, welche ausschließlich für das Entladen eines Lkws vorgesehen sind, ist zusätzlich ein vereinfachter Einlagerungsprozess im Simulationsmodell implementiert. Dieser gewährleistet, dass nach der Entladung

eines Lkws nicht unmittelbar ein weiterer Lkw entladen werden kann. Dies ist erst möglich, wenn die entsprechenden EPALs von den jeweiligen automatischen Verladesystemen entfernt wurden. Da es sich bei diesen Einlagerungsprozessen um eine manuelle Tätigkeit handelt, ist die Einlagerungszeit mit einer entsprechenden Erlang-K-Verteilung versehen (Gutenschwager et al., 2017).

Im Bereich LG befindet sich die Bereitstellung des Leerguts. Dieses wird erzeugt, sobald der Bedarf im Produktionsbereich ausgelöst wird. Anschließend erfolgt die Bereitstellung des notwendigen Leerguts in einer Menge von 30 EPAL in einem Zeitintervall von ca. 25 Minuten. Nach der Bereitstellung erfolgt die Aufnahme durch einen Lkw. Aufgrund der manuellen Bereitstellung des Leerguts auf das entsprechende Verladesystem, ist diese Zeit ebenfalls mit einer Erlang-K-Verteilung zu versehen.

Der Bereich R markiert die Implementierung der unterschiedlichen Routen. Hierbei sind im Simulationsmodell die entsprechenden Fahrzeiten inkl. Verteilung hinterlegt. Für den Hin- als auch für den Rückweg kann jeweils eine der drei Routen gewählt und somit der Einfluss auf das Gesamtsystem untersucht werden.

Anhand dieser Informationen kann beispielsweise, in Abhängigkeit unterschiedlicher Produktionspläne und Fahrtrouten, untersucht werden, wie viele Lkws benötigt werden, und ob ggf. ein Springereinsatz in den Pausen der Lkw-Fahrer von Vorteil ist.

6 Auswirkung

Mithilfe dieser Daten konnten unterschiedliche, realistische Einflüsse in Bezug auf die Produktionsplanung und den signifikanten Einfluss der Fahrzeit der Lkw evaluiert werden. Mit lediglich einer durchschnittlichen Fahrzeit und der jeweiligen Spitzenlast pro Produktionslinie wäre dies nicht möglich und eine erhebliche Überdimensionierung der Installationen wäre die Folge.

So konnte aufgezeigt werden, wann ein Mehrbedarf an Lkws vorliegt oder eine geringere Anzahl ausreichend ist. Beispielsweise ist für den Produktionsplan in der Frühschicht eine Anzahl von vier Lkw erforderlich. In der Nachtsicht wiederum sind 3 Lkw ausreichend. Dies führte zu Überlegungen über die Implementierung eines flexiblen Personaleinsatzes im Bereich des Lkw-Transports und einer dynamischen Pausengestaltung der Lkw-Fahrer.

Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass im Produktionsbereich 2 eine höhere Verladekapazität zur Verfügung steht als für die Entladung der Fertigware von Produktionsbereich 2 im Logistikzentrum. Dies führte zu Wartezeiten der Lkw, da für die Entladung der Fertigware ausschließlich ein automatisches Verladesystem vorgesehen war. Der Engpass ist hierbei nicht die Entladegeschwindigkeit der automatischen Verladesysteme, sondern die Einlagerungszeit in das nachgelagerte Blocklager. So bestand die Möglichkeit, in ein zusätzliches Verladesystem für die Entladung von Fertigware aus Produktionsbereich 2 zu investieren. Durch die Simulation konnte jedoch dargestellt werden, dass das Auflösen der strikten Zuweisung eines automatischen Verladesystems für die Entladung der Fertigware aus Produktionsbereich 2 ausreichend ist, um die Wartezeiten auf ein Minimum zu

reduzieren. Somit ist keine zusätzliche Investition in ein weiteres Verladesystem erforderlich.

Ebenso konnte aufgezeigt werden, welche Auswirkung unterschiedliche Produktionspläne (Produkte mit hoher Ausbringungsmenge vs. niedrige Ausbringungsmenge) auf das Risiko für einen Rückstau haben. Insbesondere während Tageszeiten mit erhöhtem Verkehrsaufkommen. Dadurch konnten entsprechende Empfehlungen für die Produktionsplanung abgeleitet werden, insbesondere die Fertigung von bestimmten Produkt-Linien-Kombinationen zu bestimmten Tageszeiten.

Überdies konnten weitere Maßnahmen erarbeitet werden, um die entsprechenden Transportkonzepte zu optimieren und das Risiko eines Produktionsstopps zu minimieren.

Literatur

- Bioly, S.; Sandhaus, G.; Klumpp, M.: Wertorientierte Maßnahmen für eine Gestaltung des demografischen Wandels in Logistik und Verkehr (2014).
- Freudl, G.: Planung von Stückgut-Umschlagbereichen mit Hilfe wissensbasierter Bewertungsmethoden. München: Utz Wiss 2001.
- Günthner, W.A.; Freudl, G.: Automatisierter Stückgutumschlag: welche Möglichkeiten bietet der Markt dem Verlader? Distribution (1999a), S. 44–47.
- Günthner, W.A.; Freudl, G.: Grenzwertbetrachtung, Alternativen zur Staplerverladung - wann ist eine Automatisierung sinnvoll? Brauindustrie (1999b) 05, S. 279–285.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017.
- Hillen, T.S., 2021: ETA-Berechnung. Online verfügbar unter <https://www.maptrip.de/eta-berechnung>, zuletzt aktualisiert am 13.01.2023, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Koether, R.: Identifikation und Codierung. In: Distributionslogistik: Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit. Wiesbaden: Gabler Verlag 2012, S. 171–184.
- Meyer, C.; Wiedenmann, R.; Unruh, V.: Automatisiertes Verladen und Ladungssicherung an der Rampe. MM Logistik (2008).
- Penno, E.; Weise, S.; Golder, M.: Flexibles LKW-Schnellladesystem. Logistics Journal : Proceedings (2020) Vol. 2020.
- Sochaczewski, A.: Technologieinformation: Automatische LKW Be- und Entladesysteme (2010).
- VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen (2014).

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Konzeptionierung eines Simulationsmodells der Rettungskette unter Gefechtsbedingungen

Simulation Model of the Military Rescue Chain in Combat Scenarios – A Conceptual Design

Kai Meisner, Sanitätsakademie der Bundeswehr,
München (Germany), kai.meisner@unibw.de

Thomas Mayer, ESG Elektroniksystem- und Logistik GmbH, Fürstenfeldbruck
(Germany), thomas3.mayer@esg.de

Heiderose Stein, Nadiia Leopold, Tobias Uhlig, Oliver Rose,
Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany),
heiderose.stein@unibw.de, tobias.uhlig@unibw.de,
nadiia.leopold@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: The intensity of current military combats far exceeds the ones of recent conflicts. Since medical resources are limited during battle, the available capacities must be used optimally. This requires distributing patients to available resources, such as medical facilities and transporters. Therefore, the effective planning and coordination of a complex, constantly changing logistics network is of utmost importance. Due to limited data, current planning is often based on expert assumptions. To evaluate current and future concepts, we propose constructive simulation to analyse the interplay of assumptions and planning decisions. For this purpose, we study the military rescue chain and review existing optimization approaches. A conceptual simulation model design is presented and an outlook of upcoming research is given.

1 Motivation

Der Angriff Russlands auf die Ukraine wird von der NATO als größte Bedrohung der alliierten Nationen bezeichnet (NATO 2022). Nachdem für etwa zwei Jahrzehnte der Afghanistaninsatz im Fokus der NATO stand, stellt damit der konventionelle Krieg im Rahmen der Landes- und Bündnisverteidigung erneut die Grundlage für die strategische Ausrichtung des Verteidigungsbündnisses dar. Berichte aus der Ukraine zeigen, dass die Intensität der Gefechte dort jene aus Afghanistan deutlich übersteigt (U.S. Department of Defense 2023; Cooper et al. 2023). Gleichzeitig sind die verfügbaren medizinischen Behandlungsressourcen in derartigen Gefechten stark

begrenzt und die Dauer für eine Evakuierung von Verwundeten verhältnismäßig hoch (Neitzel und Ladehof 2015).

Für eine bestmögliche Behandlung verwundeter Soldaten müssen die verfügbaren medizinischen Einrichtungen effizient genutzt werden. Die Patienten müssen entsprechend ihrer Bedürfnisse und unter Berücksichtigung der verfügbaren Transportmittel auf die medizinischen Einrichtungen verteilt werden. Hierdurch entsteht ein komplexes Logistiknetz, welches durch die Dynamik des Gefechts zusätzlich ständigen Veränderungen unterliegt. Derzeitige sanitätsdienstliche Planungen beruhen auf einer Reihe von Annahmen, mithilfe derer Opferzahlen und auftretende Verwundungsmuster geschätzt werden. Auf Grundlage des hiervon abgeleiteten vermuteten Patientenflusses werden Pläne für die wahrscheinlichsten Szenarien erstellt (NATO Standardization Office 2019).

Demnach erfolgt derzeit eine statische Ausplanung für ein hochdynamisches Logistiksystem. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie diese Planung durch den Einsatz von Simulation unterstützt werden kann. Hierfür wird die militärische Rettungskette als zu untersuchendes System vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 3 die zu betrachtenden Fragestellungen beschrieben. Verwandte Arbeiten werden in Abschnitt 4 vorgestellt und die Notwendigkeit eines flexiblen Simulationsmodells herausgearbeitet. Das Konzept eines für diese Untersuchung geeigneten Modells wird in Abschnitt 5 präsentiert. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Militärische Rettungskette

In Krisen- und Kriegsgebieten kann selten auf ein bestehendes Gesundheitssystem zurückgegriffen werden. Deshalb muss vor Ort ein sanitätsdienstliches System aufgebaut werden, um die medizinische Versorgung gewährleisten zu können. Während militärischer Gefechte kommen vermehrt Verwundete mit akut lebensbedrohlichen Verletzungsmustern auf. Gleichzeitig finden diese Gefechte zunehmend in ausgedehnten Räumen statt, wodurch die Evakuierung Verwundeter verhältnismäßig lange dauert. Hierdurch ist die präklinische Versorgung von besonderer Relevanz für die Überlebenschance der Patienten (Neitzel und Ladehof 2015). Durch den Zusammenschluss verschiedener Behandlungsebenen zu einer Rettungskette soll der schnellstmögliche Abtransport Verwundeter unter Berücksichtigung der akutmedizinischen Versorgung gewährleistet werden (United States Department of the Army 2019). Diese Behandlungsebenen sowie deren Nutzung zur medizinischen Evakuierung werden im Folgenden erläutert.

Die Behandlungsebenen der sanitätsdienstlichen Rettungskette sind durch das NATO Standardization Office (2019) definiert. Anfallende Verwundete werden zunächst in einer Verwundetensammelstelle (Casualty Collection Point - CCP) gesammelt. Von hier aus werden diese entlang von vier aufeinanderfolgenden Behandlungsebenen, den sogenannten Rollen 1 bis 4, versorgt. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Jeder der vier Rollen sind medizinische Einrichtungen mit verschiedenen Ressourcen und Fähigkeiten zugeordnet. Diese basieren jeweils auf jenen der vorherigen Rolle und ergänzen diese. In der Rolle 1 findet beispielsweise eine Notfallversorgung statt, während in der Rolle 2 bereits erste notfallchirurgische Eingriffe durchgeführt werden können. Die Rolle 3 kann weitere Fachdisziplinen abbilden und bereits das Niveau einer Universitätsklinik aufweisen. In der Rolle 4 erfolgt die Weiterbehandlung und

Rehabilitation. Diese befindet sich normalerweise im Heimatland des Patienten (Neitzel und Ladehof 2015). Damit ist diese nicht Teil der Notfallbehandlung im Gefecht und wird deshalb im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Laut United States Department of the Army (2022) befindet sich der CCP ca. 1-3 Kilometer und die Rolle 1 ca. 5-7 Kilometer hinter der Gefechtslinie. Die Entfernung zur Rolle 2 hingegen beträgt bereits 20-25 Kilometer. Damit gewährleistet die Behandlung entlang der Rettungskette eine schnellstmögliche Akutbehandlung und bereitet damit Patienten für die Evakuierung in höhere Rollen vor. Die Rettungskette ist jedoch nicht linear und Rollen können übersprungen werden. Dies kann beispielsweise aufgrund des Bedarfs spezieller Behandlungsressourcen oder zur Entlastung früherer Rollen erfolgen. Auch kann die Ausstattung der Einrichtungen innerhalb einer Rolle variieren (NATO Standardization Office 2019).

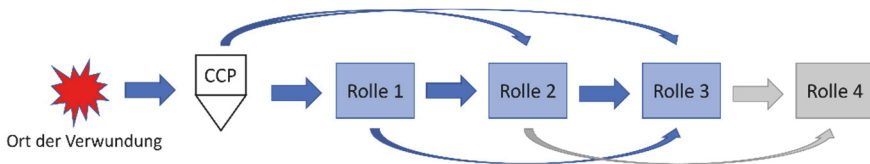


Abbildung 1: Verwundete werden zu einer Verwundetensammelstelle (CCP) verbracht und von dort aus entlang der Pfeile in den vier Rollen behandelt.

Ein fundamentaler Aspekt der Behandlung entlang der Rettungskette ist der Patiententransport. Dieser wird als medizinische Evakuierung (Medical Evacuation - MEDEVAC) bezeichnet. Dem MEDEVAC sind durch die NATO strikte Zeitlinien für den Transport von kritischen Verwundeten auferlegt (NATO Standardization Office 2019). Es muss gewährleistet werden, dass Verwundete binnen einer Stunde eine Notfallbehandlung in mindestens der Rolle 1 erhalten. Bis zur Behandlung in der Rolle 2 oder höher dürfen nicht mehr als zwei Stunden seit dem Zeitpunkt der Verwundung vergehen. Um dies gewährleisten zu können, werden verschiedene Konzepte zur effizienten Ausnutzung von Transportressourcen angewandt. Hierzu zählt beispielsweise das Zusammenlegen von Patienten aus zwei Transportern an einer Ambulanzwechselstelle (Ambulance Exchange Point - AXP) und der anschließende Weitertransport in einem Fahrzeug. An Bereithalteplätze für Patienten (Casualty Staging Unit - CSU) hingegen können Patienten nahe einem Flughafen gesammelt und anschließend zusammen luftgebunden evakuiert werden. In beiden Fällen kann eine höhere Auslastung und effizientere Nutzung der Transportressourcen erreicht werden, wie in Abbildung 2 dargestellt ist (NATO Standardization Office 2019; United States Department of the Army 2019).

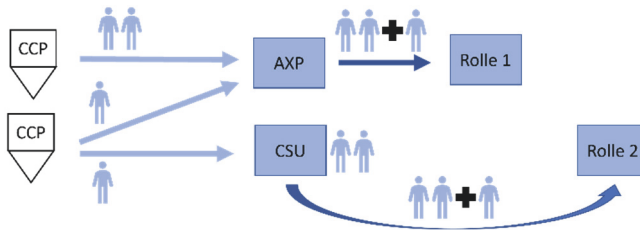


Abbildung 2: Ambulanzwechselstellen (AXP) und Bereithalteplätze für Patienten (CSU) ermöglichen eine effizientere Nutzung der Transportressourcen.

3 Problemstellungen

Für die Planung und Koordinierung des MEDEVACs werden durch Jenkins und Robbins (2022) zwei zu untersuchende Problemstellungen definiert: das *Verteilungsproblem* und das *Zuweisungsproblem*.

Unter dem Verteilungsproblem wird die Frage nach der Dislozierung der medizinischen Ressourcen verstanden. Hierunter fallen sowohl die Behandlungsebenen als auch die Transportressourcen. Neben der statischen Ausplanung muss ebenfalls die Reaktion auf unterschiedliche Effekte der Gefechtsdynamik geplant werden (Mayer und Mattiesen 2022). Auslöser hierfür können beispielsweise Schwerpunktbildungen oder Ressourcenausfälle sein, welche eine dynamische Verlegung oder Umverteilung von Ressourcen bewirken können.

Das Zuweisungsproblem betrachtet die Allokation der medizinischen Ressourcen. Für jeden Behandlungsbedarf von Patienten muss entschieden werden, ob und mit welchen Ressourcen diesem nachgegangen wird. Insbesondere durch die fehlende Linearität der Rettungskette spannt sich dabei ein komplexes Logistiknetz auf. Dabei gilt es, die Patienten unter der effizienten Nutzung der Transportressourcen bestmöglich auf die verschiedenen Behandlungsebenen zu verteilen.

Für die Untersuchung dieser Fragestellungen ist neben der statischen Ausplanung der Rettungskette eine Untersuchung dieser in dynamischen Szenarien essenziell. Erst hierdurch kann das Zusammenspiel der einzelnen sanitätsdienstlichen Ressourcen sowie deren Verhalten in unterschiedlichen Szenarien bewertet und optimiert werden. Um eine Ausplanung der Rettungskette entsprechend validieren zu können, muss diese hinsichtlich dieser beiden Fragestellungen in dynamischen Szenarien untersucht werden können. Hierfür sollten bevorzugt Simulationsmodelle eingesetzt werden, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

4 Verwandte Arbeiten

Den beiden genannten Problemstellungen wurde sich in der Vergangenheit mit unterschiedlichen Verfahren genähert. Green und Kolesar (2004) zeigen, dass sowohl Simulationen als auch Optimierungsverfahren bereits erfolgreich zur Verbesserung der notfallmedizinischen Reaktionsfähigkeit eingesetzt werden konnten. Im militärischen Kontext wurde in der Vergangenheit insbesondere die luftgebundene Patientenevakuierung betrachtet. Hierbei kamen Verfahren des Operations Research wie die mathematische und dynamische Programmierung sowie Markov Entscheidungsprobleme zum Einsatz (Frial 2022). Wie Jenkins et al. (2023) zeigen,

wurde dabei meist nur das Verteilungsproblem mit Blick auf die Transportressourcen betrachtet. Die Verlegung und Neuzuweisung von Ressourcen hingegen wurden selten untersucht. Auch wurde bereits gezeigt, dass Verfahren wie die mathematische Programmierung oftmals die Dynamik von medizinischen Systemen nicht voll umfassen können (Yue et al. 2012). Stattdessen wird die Nutzung von Simulationsmodellen empfohlen, um mit der hohen Komplexität und Unsicherheit von derartigen Systemen umzugehen und dynamische Effekte analysieren zu können (Pinto et al. 2015; Lechtenberg et al. 2017).

Es wurden bereits verschiedene Simulationen im Kontext der Rettungskette vorgestellt. Dabei wurde meist nur ein Teilaspekt des Systems untersucht. Frial (2022) untersucht beispielsweise die Ressourcenallokation für die Patientenevakuierung bis zu der ersten Behandlungsebene. Procházka et al. (2021) erweitern dies um die Betrachtung der anschließenden Behandlung, beschränken sich jedoch auf den CCP und die Rolle 1. Lediglich Kleint und Geck (2021) bilden die Rettungskette vom CCP bis zur Rolle 3 ab. In dieser Simulation wird das Gefechtsfeld in Zonen mit verschiedenen Ankunftsrate an Verwundeten unterteilt. Diese stellen zudem die verschiedenen Verantwortungsbereiche auf dem Gefechtsfeld dar, welche näher in United States Department of the Army (2022) beschrieben sind. Für jeden Verwundeten werden die für die Versorgung benötigten Ressourcen und eine Zeit festgelegt, in welcher die jeweilige Behandlung zu erfolgen hat (Kleint et al. 2021). Jeder medizinischen Einrichtung wird eine Menge von Einrichtungen der nächsthöheren Rolle in derselben oder übergeordneten Zone zugeordnet (Kleint et al. 2021). Hieraus ergibt sich eine Rettungskette, die einer festen Hierarchie folgt und damit kein Überspringen von Rollen ermöglicht. Durch die Anpassbarkeit des Patientenaufkommens und der Verwundungsmuster sowie der quantitativen und räumlichen Ressourcenverteilung soll die Ausplanung einer durchhaltefähigen Rettungskette ermöglicht werden. Damit wird die Untersuchung des Verteilungsproblems fokussiert.

Vorangegangene Arbeiten zeigen demnach, dass sich Simulationen zur Untersuchung der Rettungskette eignen. Gleichzeitig wurde jedoch noch kein Modell vorgestellt, das eine hinreichende Untersuchung und Optimierung hinsichtlich des Verteilungs- und Zuweisungsproblems ermöglicht. Diese Beobachtung wird durch Tippong et al. (2022) bestätigt. Die Autoren betonen den Forschungsbedarf im Bereich der Optimierung logistischer Netzwerke medizinischer Einrichtungen sowie der in Abschnitt 2 vorgestellten MEDEVAC-Konzepte.

5 Simulationskonzept

Damit künftig Planungen der Rettungskette mit Blick auf die genannten Fragestellungen untersucht werden können, wird im Folgenden das Konzept eines hierfür geeigneten Simulationsmodells vorgestellt. Dabei wird die Notfallversorgung im Einsatz entlang der Rettungskette vom CCP bis zur Rolle 3 unter Berücksichtigung der Gefechtsdynamik abgebildet.

Wie in Abschnitt 3 erörtert wurde, ist neben der statischen Ausplanung der Rettungskette die Untersuchung selbiger in dynamischen Szenarien nötig. Dazu muss das dynamische Verhalten der simulierten Objekte flexibel definierbar sein, um das Verteilungs- und das Zuweisungsproblem hinreichend untersuchen zu können. Dies bildet die Grundlage für die Validierung und Optimierung von Konzepten der

Rettungskette. Insbesondere für die Betrachtung der verschiedenen MEDEVAC-Konzepte muss eine große Bandbreite an Strategien der Ressourcenallokation abbildbar sein. Ebenfalls müssen die Szenarien selbst adaptierbar sein. Dies betrifft beispielsweise das Festlegen von sich ändernden Ankunftsdaten der Patienten, Truppenbewegungen oder Ausfälle von Ressourcen.

Um die geforderte Dynamik und Flexibilität zu erreichen, werden anzupassende Aspekte der Simulation als Teilmodelle von dem eigentlichen Modell entkoppelt. Dies ist in Abbildung 3 abgebildet. Das rot dargestellte Modell enthält die gelb visualisierten zu simulierenden Objekte und kann Zustandsänderungen an diesen vornehmen. Hierfür werden exemplarisch die *Patienten*, *Transporter* und medizinischen *Einrichtungen* genannt. Das Modell selbst wird anhand von Eingabedaten und Parameter konfiguriert. Hierdurch kann die initiale Ausplanung der Rettungskette erfolgen. Die geforderte Dynamik wird mithilfe der grün dargestellten Teilmodelle realisiert. Diese werden über die durch das Modell vorgenommenen Zustandsänderungen in Echtzeit informiert. Basierend auf den hinterlegten Regeln können diese Teilmodelle entsprechend reagieren und mittels Aktionen über das Modell Zustandsänderungen der Objekte veranlassen. Auch kann das Verhalten zu einem zuvor definierten Simulationszeitpunkt festgelegt werden. Dadurch kann sich beispielsweise die Ankunftsrate der Verwundeten ändern oder es können Ressourcen ausfallen. Damit kann die Gefechtsdynamik durch entsprechende Szenarien abgebildet werden.

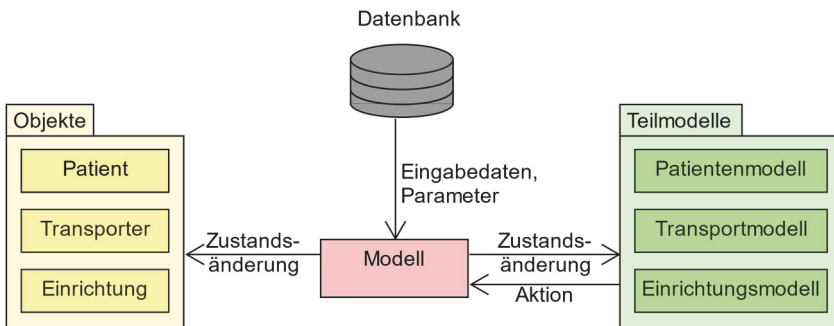


Abbildung 3: Das Modell (rot) bewirkt Zustandsänderungen der simulierten Objekte (gelb). Teilmodelle (grün) werden über Zustandsänderungen der Objekte informiert und können über Aktionen selbst welche veranlassen.

Das Modell überprüft die Anfragen der Teilmodelle auf Validität und simuliert die Zustandsänderung mit all ihren Effekten. Auf diese Weise kann das *Einrichtungsmodell* beispielsweise Einrichtungen aufgrund von Ressourcenausfällen verlegen lassen. Zusätzlich lässt sich über diese Teilmodelle die Ressourcenallokation durchführen. Auf diese Weise kann das *Transportmodell* auf eingehende MEDEVAC-Anfragen reagieren und die simulierten Transporter entsprechend steuern. Über das *Patientenmodell* lassen sich die Ankunftsdaten sowie Verwundungsmuster der auftretenden Patienten definieren.

Um der fehlenden Linearität der Rettungskette gerecht zu werden, wird auf die strenge Unterteilung in die drei Rollen verzichtet. Stattdessen werden

Behandlungseinrichtungen durch die verfügbaren Ressourcen und Fähigkeiten definiert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Jede Ressource wird dabei in einer festgelegten Quantität vorgehalten und kann Patienten zugewiesen werden, beispielsweise OP-Plätze und Pflegebetten. Fähigkeiten hingegen werden als Voraussetzung für bestimmte Behandlungsschritte angesehen, ohne dabei Patienten fest zugewiesen zu werden, wie beispielsweise medizinische Qualifikationen. Auch werden hierunter Ressourcen zusammengefasst, deren Quantität nicht berücksichtigt wird, da die Modellierung zu feingranular wäre, wie zum Beispiel Röntgengeräte.

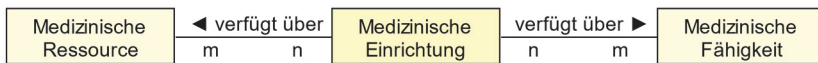


Abbildung 4: Medizinischen Einrichtungen werden über ihre Ressourcen und Fähigkeiten definiert.

Durch diese Definition der Behandlungseinrichtungen lässt sich ein Behandlungsplan für Patienten beschreiben. Wie in der Abbildung 5 visualisiert ist, wird für jeden Patienten ein Zustandsautomat hinterlegt.

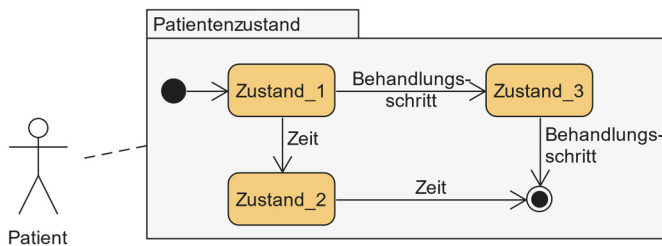


Abbildung 5: Der Patientenzustand wird über einen Zustandsautomaten realisiert. Jeder Zustand (orange) definiert den nächsten benötigten Behandlungsschritt. Zustandsübergänge können durch eine erfolgte Behandlung oder nach einer definierten Zeit erfolgen.

Ein Zustand spiegelt die aktuelle gesundheitliche Verfassung des Patienten wider. Ein Übergang in einen neuen Zustand erfolgt entweder nach einer bestimmten Zeit ohne Behandlung oder durch einen erfolgten Behandlungsschritt der Form:

$$\text{Behandlungsschritt} := [\text{Ressourcen}, \text{Fähigkeiten}, \text{Zeit}]$$

Damit wird ein Behandlungsschritt als Tripel bestehend aus den benötigten medizinischen Ressourcen, Fähigkeiten und der für die Behandlung nötige Zeit definiert. Dadurch wird implizit festgelegt, welche medizinischen Einrichtungen diesen Schritt ausführen können. Dennoch ist die Behandlung nicht an eine feste Rolle gebunden. Stattdessen kann eine Rolle übersprungen und die Behandlung in der nächsthöheren erfolgen, falls diese über die geforderten Ressourcen und Fähigkeiten verfügt. Eine ähnliche Beschreibung des Patientenzustands wurde bereits durch Van Utterbeeck et al. (2011) beschrieben. Der Zustandsautomat wird in dem vorgestellten Konzept ebenfalls durch das *Patientenmodell* beschrieben. Damit ist es, wie die anderen Teilmodelle auch, künftig beliebig austausch- und erweiterbar. Auf diese

Weise können unterschiedliche Verwundungsmuster mit den entsprechenden Behandlungsplänen beschrieben werden.

Ein Patient kann sich während der Behandlung entlang der Rettungskette in verschiedenen Aktivitäten befinden. Diese sind in Abbildung 6 grau dargestellt. Während der Aktivität *warten* werden jeweils die benötigten Behandlungs- oder Transportressourcen angefordert, wie durch die gelben Symbole visualisiert ist. Demnach wird zu diesem Zeitpunkt über die Ressourcenallokation entschieden und entsprechend das Zuweisungsproblem betrachtet. Das für die Entscheidung angewandte Konzept wird in den zuvor beschriebenen Teilmodellen *Transportmodell* und *Einrichtungmodell* implementiert. Sobald eine Ressource zugewiesen wurde und der Patient diese erhalten hat, wechselt dieser in die Aktivität *transportieren* oder *behandeln*. Nach Abschluss der Aktivität können erneut in *warten* Ressourcen angefordert oder in den Endzustand übergegangen werden. Der Endzustand kann entweder durch vollständiges Abarbeiten des Behandlungsplanes oder durch vorzeitiges Versterben des Patienten erreicht werden.

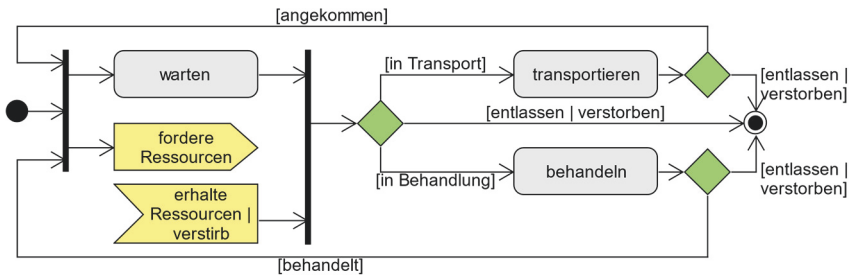


Abbildung 6: Ein Patient kann sich in verschiedenen Aktivitäten (grau) befinden und Transport- oder Behandlungsressourcen anfordern (gelb).

Durch den vorgestellten Ansatz können Ausplanungen der sanitätsdienstlichen Rettungskette validiert und optimiert werden. Mithilfe von Parametern und Eingabedaten lassen sich die sanitätsdienstlichen Ressourcen initial platzieren sowie deren Kapazitäten und Fähigkeiten festlegen. Die austauschbaren Teilmodelle erlauben das dynamische Reagieren auf Zustandsänderungen innerhalb der Simulation. Durch geeignete Kombination der bereitgestellten Aktionen soll auf diese Weise komplexes Objektverhalten durch die Teilmodelle definierbar sein, ohne dabei das Simulationsmodell selbst adaptieren zu müssen. Mithilfe des vorgestellten Patienten- und Einrichtungmodells kann die fehlende Linearität der Rettungskette geeignet abgebildet werden. Damit soll es künftig möglich sein, mit diesem Modell ein weites Spektrum an Analysen und Optimierungen der Rettungskette mit Blick auf das Verteilungs- und Zuweisungsproblems vornehmen zu können. Damit werden die in Abschnitt 3 definierten Anforderungen erfüllt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Simulation der Rettungskette vorgestellt. Hierfür wurden das Verteilungs- und Zuweisungsproblem als zu untersuchende Problemstellungen definiert. Es wurde gezeigt, dass hierfür neben der statischen

Ausplanung der Rettungskette das dynamische Verhalten der simulierten Objekte adaptierbar sein muss. Auch wurde betont, dass die fehlende Linearität der Rettungskette geeignet abzubilden ist. Die Nutzung von Simulationsmodellen wurde hierfür als geeignete Methode herausgearbeitet. Es wurde jedoch deutlich, dass bestehende Modelle keine geeignete Untersuchung der Rettungskette hinsichtlich der definierten Problemstellung erlauben.

Die statische Ausplanung der Rettungskette in dem vorgestellten Simulationskonzept erfolgt durch Eingabedaten und Parameter. Das dynamische Verhalten der Objekte hingegen wird durch Teilmodelle realisiert. Diese lassen sich flexibel adaptieren und austauschen. Durch die Definition der Behandlungseinrichtungen mittels der medizinischen Ressourcen und Fähigkeiten lässt sich das Überspringen von Rollen innerhalb der Rettungskette geeignet modellieren. Damit lässt sich die Rettungskette mit ihrer fehlenden Linearität geeignet abbilden.

Durch seine Adaptierbarkeit bildet das vorgestellte Simulationskonzept die Grundlage für die künftige Validierung und Optimierung von Ausplanungen der sanitätsdienstlichen Rettungskette. Dieses Konzept sollte in einem nächsten Schritt prototypisch implementiert werden, um die Realisierbarkeit zu demonstrieren. Dabei sollte insbesondere getestet werden, wie die Kommunikation zwischen dem Modell und den Teilmodellen geeignet umgesetzt werden kann. Auch sollte definiert werden, über welche Zustandsänderungen die Teilmodelle jeweils informiert werden und welche Aktionen durch das Modell bereitgestellt werden.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit ist Teil des Projektes „LogSimSanDstBw – Simulationsbasierte Logistikanalysen“ und wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

Literatur

- Cooper, H.; Schmitt, E.; Gibbons-Neff, T.: Soaring Death Toll Gives Grim Insight Into Russian Tactics. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/02/02/us/politics/ukraine-russia-casualties.html>, letzter Zugriff 04.02.2023.
- Frial, V.B.: Evaluating the Military Medical Evacuation Dispatching and Delivery Problem via Simulation and Self-Exciting Hawkes Process, Masterarbeit Air Force Institute of Technology, Department of Operational Science, 2022.
- Green, L.V.; Kolesar, P.J.: Improving Emergency Responsiveness with Management Science. *Management Science* 50 (2004) 8, S. 1001–1014.
- Jenkins, P.R.; Robbins, M.J.: Military and Security Applications: Medical Evacuation. In: Floudas, C.A.; Pardalos, P.M. (Hrsg.): *Encyclopedia of Optimization*. Cham: Springer 2022.
- Jenkins, P.R.; Robbins, M.J.; Lunday, B.J.: Optimising aerial military medical evacuation dispatching decisions via operations research techniques. *BMJ Military Health* 169 (2023) 1, 90-92.
- Kleint, R.; Geck, A.: Simulation-Based Decision Support for the Logistic System of the German Armed Forces. In: *Towards Training and Decision Support for*

- Complex Multi-Domain Operations, Amsterdam (Niederlande) 21.-22. Oktober 2021.
- Kleint, R.; Mayer, T.; Uhlig, T.: Logistic Simulation to Support Military Rescue Chains. In: I/ITSEC 2021, Orlando (USA), 29. November-03. Dezember 2021.
- Lechtenberg, S.; Widera, A.; Hellingrath, B.: Research directions on decision support in disaster relief logistics. In: Middelhoff, M.; Yahiaoui, S. (Hrsg.): 2017 4th International Conference in Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), Münster (Deutschland), 11.-13. Dezember 2017.
- Mayer, D.; Mattiesen, B., 2022: Forschung und Fähigkeitsentwicklung im -Sanitätsdienst der Bundeswehr. <https://wehrmed.de/fuehrungsorganisation/forschung-faehigkeitsentwicklung-im-sanitaetsdienst-der-bundeswehr.html>, letzter Zugriff 23.04.2023.
- NATO, 2022: NATO - Topic: Strategic Concepts. https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_56626.htm, zuletzt aktualisiert am 18.07.2022, letzter Zugriff 30.04.2023.
- NATO Standardization Office, 2019: AJP-4.10: Allied Joint Doctrine For Medical Support. https://www.coemed.org/files/stanags/01_AJP/AJP-4.10_EDC_V1_E_2228.pdf, letzter Zugriff 30.04.2023.
- Neitzel, C.; Ladehof, K. (Hrsg.): Taktische Medizin: Notfallmedizin und Einsatzmedizin. Berlin, Heidelberg: Springer 2015.
- Pinto, L.R.; Silva, P.M.S.; Young, T.: A generic method to develop simulation models for ambulance systems. *Simulation Modelling Practice and Theory* 51 (2015), S. 170–183.
- Procházka, D.; Hodický, J.; Krejčík, M.; Tesař, A.: Modelling and Simulation Support to Medical Treatment Chain in Role 1. In: Mazal, J.; Fagiolini, A.; Vasik, P.; Turi, M.; Bruzzone, A.; Pickl, S.; Neumann, V.; Stodola, P. (Hrsg.): Modelling and Simulation for Autonomous Systems, virtuell, 13.-14. Oktober 2021, S. 464–477.
- Tippong, D.; Petrovic, S.; Akbari, V.: A review of applications of operational research in healthcare coordination in disaster management. *European Journal of Operational Research* 301 (2022) 1.
- U.S. Department of Defense, 2023: Casualty Status. <https://www.defense.gov/casualty.pdf>, letzter Zugriff 06.07.2023.
- United States Department of the Army, 2019: ATP 4-02.2: Medical Evacuation. https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/pdf/web/ARN17834_ATP%204-02x2%20FINAL%20WEB.pdf, letzter Zugriff 30.04.2023.
- United States Department of the Army, 2022: ATP 4-02.6: The Medical Company (Role 2). https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/ARN36760-ATP_4-02.6-000-WEB-1.pdf, letzter Zugriff 24.04.2023.
- Van Utterbeeck, F.; Ullrich, C.; Dhondt, E.; Debacker, M.; Murray, J.L.; Van Campen, S.: Generating and managing realistic victims for medical disaster simulations. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, P.K.; Fu, M.C. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Conference (WSC), Phoenix (USA), 11.-14. Dezember 2011, S. 2674–2684.
- Yue, Y.; Marla, L.; Krishnan, R.: An Efficient Simulation-Based Approach to Ambulance Fleet Allocation and Dynamic Redeployment. In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Kalifornien (USA), 22.-26 Juli 2012, S. 398–405.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Verbesserung der Versorgungssicherheit im Rettungsdienst – Lieferkettenmodellierung bei unvollständigen Daten

Ensuring Supply for Emergency Services – Modelling Supply Chains with Incomplete Sets of Data

Johanna Kim Kippenberger, Michael Dominik Görtz, John Christopher Maleki,
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund (Germany),
johanna.kim.kippenberger@iml.fraunhofer.de,
michael.dominik.goertz@iml.fraunhofer.de, john-
christopher.maleki@iml.fraunhofer.de

Paul Geoerg, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.,
Münster (Germany), geoerg@vfdb.de

Abstract: To ensure material availability for public health and safety services, supply chain simulation could be used to identify the risk of bottlenecks due to disruptions in global supply chains. However, these stakeholders do not have the detailed knowledge about their supply chains required for reliable simulation results. A new approach is presented in this article, which enables the modeling of a supply chain without full knowledge about each process node. It consists of generic data containers, each representing typical nodes within a supply chain with plausible process parameters, boundaries, and distributed values. We present the conceptual feasibility of the approach through a case study and demonstrate the methodology for modelling a supply chain for detailed bottleneck analysis and automated risk assessment of a public health and safety supply chain.

1 Motivation

In den vergangenen Jahren waren Gesellschaften weltweit mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert, welche sich im Zusammenhang mit den jüngsten Krisen (COVID-19-Pandemie, Ukrainekrieg) weiter verstärkt haben. Diese Krisen wirkten in schneller Abfolge und über mehrere Wirtschaftsräume hinweg. Produzierende Unternehmen und Händler waren dabei im Besonderen mit der Herausforderung konfrontiert, ihre weltweit verflochtenen Lieferketten aufrechtzuerhalten. Bei stark dynamischer Nachfrage und unterbrochenen

Produktionen wurden auch Prozessgrößen wie Transportzeiten und -kosten stark beeinflusst (Handfield et al. 2020).

Dies hatte nicht nur Folgen für die produzierende Industrie. Auch Branchen, für die Lieferketten bislang eine untergeordnete Rolle spielten (z.B. Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), Gesundheitswesen, etc.), waren von diesen Auswirkungen betroffen. Neben Medikamenten (BfArM 2023a) kam es bei zahlreichen Produkten, welche zur Versorgung von Patient:innen oder zum Schutz von Personal notwendig sind, zu Engpässen (Kagermann et al. 2021). Somit gefährdete neben dem vorherrschenden Personalmangel auch eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Ge- und Verbrauchsmitteln sowie Medikamenten die Versorgungssicherheit in kritischen Infrastrukturen. Die Notwendigkeit resilienter Versorgungsnetze und die Möglichkeit, drohende Versorgungsengpässe frühzeitig identifizieren zu können, wurde so eindrucksvoll illustriert.

Eine etablierte Methode zur Analyse der Auswirkungen von Disruptionen auf Lieferketten ist die Simulation. Sie erlaubt es, die Auswirkungen von Disruptionen auf die gesamte Lieferkette szenariobasiert zu untersuchen und Engpässe zu identifizieren (Ivanov 2020). Cope et al. (2007) und Hermes (2011) beschreiben unterschiedliche Verfahren, bei denen mittels Modellbausteinen die Modellierung von Lieferketten und die Übertragung der Modelle in eine Simulationsumgebung erleichtert wird.

Lieferkettensimulationen werden vorrangig bei produzierenden Unternehmen eingesetzt (Oliveira et al. 2016), welche fundierte Kenntnisse über die Tiefe ihrer Lieferketten - auch über 1st-tier Zulieferer hinaus - besitzen. Sind diese Informationen verfügbar, lassen sich Prozesse aussagekräftig und zuverlässig analysieren (Akhavian und Behzadan 2013). In BOS sind diese Informationen in der Regel aufgrund der Beschaffungsstruktur über Großhändler jedoch nicht verfügbar. Um BOS eine Lieferkettensimulation zu ermöglichen, muss zunächst die Problematik der unvollständigen Lieferkettendaten gelöst werden.

Das Problem unvollständiger Daten wird in der Literatur als praxisrelevantes Thema identifiziert (Eekhout et al. 2012) und wissenschaftlich adressiert. Dabei stehen Verfahren für fehlende quantitative Daten im Vordergrund (Röhrig und Rockel 2020). Oliver et al. (2022) adressieren dieses Thema mit einer Modellierungsstudie zu nationalen US-Lieferketten im Kontext von Naturkatastrophen. Sie nutzen dabei stochastische Verfahren, um Schlüsselparameter wie Bestellmengen und Transportzeiten auf einem aggregierten Produktklassenlevel (z.B. „Paket Essen“) zu beschreiben.

Für die Durchführung einer Lieferkettensimulation müssen sowohl quantitative als auch qualitative Daten modelliert werden. In diesem Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, die dabei unterstützt, Datenlücken zu schließen und dadurch die Anwendung der Lieferkettensimulation ermöglicht.

2 Anwendungsfall

Im Rahmen des Anwendungsfalls wird die Lieferkette eines Rettungsdienstes für zwei Produkte (Spritze und Medikament ASS) betrachtet. Die Nachfrage des Rettungsdienstes nach Spritzen und ASS wird über einen Großhändler bedient. Der Großhändler bezieht Spritzen von zwei unterschiedlichen Produzenten, welche

wiederum von mehreren Lieferanten mit Rohstoffen versorgt werden. Das Produkt ASS wird von einem Produzenten mit mehreren Lieferanten bezogen. Analog zum typischen Produktportfolio bundesdeutscher Rettungsdienstorganisationen ist in diesem Anwendungsfall anzunehmen, dass es sich um eine mehrstufige Lieferkette (Abbildung 1) mit potenziell risikobehafteten Überseetransporten zwischen Produzenten und Händler handelt (Lau und Osterloh 2022).

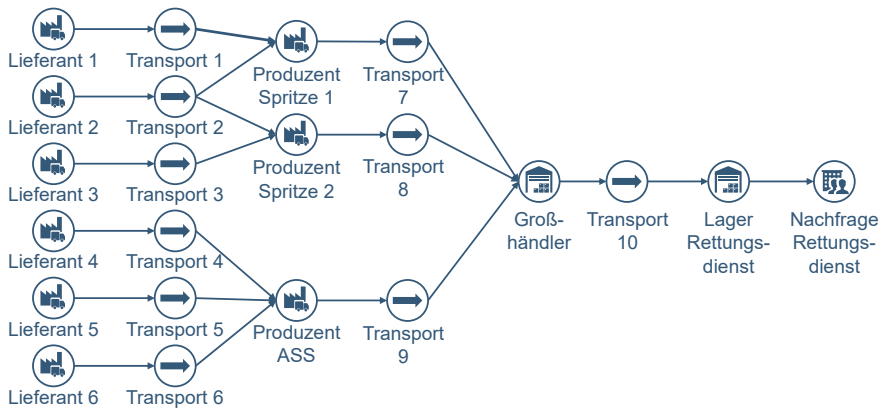


Abbildung 1: Vereinfachte Beispiellieferkette für den Rettungsdienst

3 Methodik

Jedes relevante Objekt der Lieferkette wird durch ein Knoten im Simulationsmodell repräsentiert. Ein Knoten ist durch den Knotentyp (z.B. Produzent, Transportweg, Lager) und die zugehörigen Prozessparameter (z.B. Transportzeit, Lagerkapazität) beschrieben. Durch die Angabe von Nachfolgerknoten findet eine Verknüpfung der einzelnen Knoten zu einem Netzwerk statt und die Struktur der spezifischen Lieferkette wird abgebildet.

Dadurch ergeben sich Informationsanforderungen, die für ein aussagekräftiges Ergebnis der Simulation notwendig sind. Während die Struktur der Lieferkette auf einem abstrakten Level noch mit geringem Aufwand recherchiert werden kann, sind die detaillierten Prozessparameter der einzelnen Knoten gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu beschaffen. So kann beispielsweise angenommen werden, dass das Medikament ASS aus dem zuvor beschriebenen Anwendungsfall in Asien produziert und anschließend per Schiff nach Europa transportiert wird, wo es dann über weitere Transportwege verteilt wird (Lau und Osterloh 2022). Die produktspezifischen Transportzeiten, Produktionskapazitäten oder Lieferanten sind jedoch meist unbekannt.

Als Lösungsansatz zum Umgang mit unvollständigen Daten wird eine modularisierte Abstraktion der Teilprozesse verfolgt. Dabei werden Prozesse (z.B. Transport vom Herstellungsland in das Verbrauchsland) auf ein höheres Level generalisiert und verallgemeinert beschrieben (Datencontainer). Die Beschreibung erfolgt aus öffentlich zugänglichen Datenquellen, Schätzungen von Domänenexperten/-innen und Analogieschlüssen. Die resultierenden Prozessparameter der Simulationsknoten

werden schließlich in Form von Datencontainern zur Verfügung gestellt. So kann es beispielsweise einen Datencontainer für den Schiffstransport von Südostasien nach Europa geben, der übliche Transportzeiten und Kapazitäten enthält. Eine zu untersuchende Lieferkette kann somit im Baukastensystem aus vorhandenen Realdaten und generischen Datencontainern modelliert und simuliert werden. Die durch den Einsatz der Datencontainer getroffenen Annahmen können dabei jederzeit durch geeignetere Datencontainer oder Realdaten ersetzt werden.

Um die Resilienz der Lieferkette bei Eintritt von Disruptionen zu untersuchen, werden für die Prozessparameter, zusätzlich zu den Standardwerten, auch Plausibilitäts Grenzen in Form von Minimal- und Maximalwerten sowie einer Verteilung ergänzt. Auf diese Weise kann die Lieferkette manuell oder automatisiert mit verschiedenen Konfigurationen simuliert und die Auswirkungen auf das gesamte Liefernetzwerk untersucht werden. Im Fall einer akuten Krise können die real existierenden Disruptionen konfiguriert werden, um die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit und die Effektivität möglicher Maßnahmen zu untersuchen.

4 Ergebnisse und Diskussionen

Anhand des Anwendungsfalls wird die Methodik für die Erarbeitung von Datencontainern zur Erleichterung der Modellierung einer Lieferkette beispielhaft demonstriert. Im Weiteren werden die Auswirkungen einer Disruption auf versorgungsrelevante Kennzahlen einer entsprechend modellierten Lieferkette simuliert und analysiert, um damit die Praktikabilität der Methodik zu demonstrieren und zu validieren.

4.1 Parametrisierung der Lieferkette durch Datencontainer

Im Folgenden wird die Generierung von Datencontainern am Beispiel des Medikamentes ASS exemplarisch nachvollzogen. Die Auswahl basiert auf einem Gesamtportfolio von 569 Items (davon 68 medizinische Wirkstoffe in 72 Medikamenten) eines verbrauchsdatenspendenden Rettungsdienstes. Die Methodik für die Beschreibung der Prozessparameter für die Verbrauchsmittel ist äquivalent.

Das Beispielmedikament mit dem Wirkstoff Acetylsalicylsäure ist ein Arzneimittel, welches nach den gültigen Leitlinien in der präklinischen Notfallmedizin zur Behandlung bei der Verdachtsdiagnose „Akutes Koronarsyndrom“ eingesetzt wird (AGNN e.V. 2021, Larsen 2016). Für diesen Wirkstoff existiert kein Patentschutz mehr, weshalb er unter verschiedenen Handelsnamen (z.B. Aspirin, ASS) in Verkehr gebracht wird. In Deutschland ist ausschließlich das Handelsprodukt "Aspirin i.V. 500 mg" des Herstellers Bayer Vital AG für die intravenöse Anwendung zugelassen. Bei Abgabe des Manuskriptes (Mai 2023) lag eine aktuelle Information über die eingeschränkte Lieferfähigkeit des Produktes bis Dezember 2023 beim Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) vor (Bayer Vital 2023). Das ermöglicht nach § 73 AMG eine zusätzliche Importmöglichkeit für das auf dem französischen Markt zugelassene Produkt Aspégic.

Die Produktionsorte werden vereinfacht durch die Adressen der Inhaber der Certificates of Suitability of Monographs of the European Pharmacopoeia (CEP) angenommen (EDQM 2023). Das Vorliegen eines gültigen Zertifikats ist

Prüfbestandteil für die nationalen Zulassungsverfahren im europäischen Wirtschaftsraum (European Medicines Agency 2016). Für den Wirkstoff Acetylsalicylsäure liegen mit Abgabe des Manuskriptes vier gültige Zertifikate vor, die das Inverkehrbringen in den europäischen Wirtschaftsraum erlauben. Die vier Zertifikatsinhaber in La Felguera (Spanien), Zibo (PR China), Tanuku (Indien) und Ecully (Frankreich) sind in Abbildung 2 durch quadratische Marker hervorgehoben und kommen als mögliche Produktionsstandorte für Wirkstoffzulieferer in Betracht.

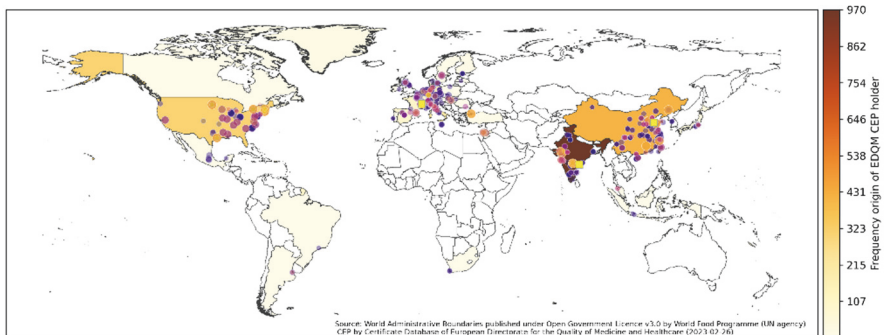


Abbildung 2: Weltweite Verteilung der Zertifikatsinhaber als Produktionsstättenäquivalent für Wirkstoffe aus dem Bestandsportfolio des verbrauchsdatenspendenden Rettungsdienstes. Daten: EDQM 2023. Eine erweiterte Darstellung ist in den zusätzlichen Materialien zu finden.

Mit Hilfe einer Distanzmatrix wurden die für den Transport notwendigen Zeiten quantifiziert. Für den Transportweg Straße (vom Produktionsstandort La Felguera (ES) und Ecully (FR)) wurden Lenk- und Ruhezeiten nach bundesdeutscher Gesetzgebung von durchschnittlich sechs Tageslenkzeiten von 9 h angenommen (auf Sonderfälle wie einmalige Lenkzeiterhöhung und Verkürzung der Erholungszeiten am Wochenende wurde verzichtet). Die Transportzeiten über den Seeweg wurden per Schiff im Less-than-Container-Mode von den nächstgelegenen Häfen der Produktionsstandorte (Zibo (CN) und Mumbai (IN)) approximiert.

Die Näherung der Produktionscharakteristiken für das zweite im Anwendungsfall betrachtete Produkt Spritze unterliegt größeren Unsicherheiten. Denn, während das Inverkehrbringen von Arzneimitteln europäisch reguliert und – mit entsprechendem Aufwand – mögliche Produktionsstandorte aus öffentlich zugänglichen Datenbanken abgeleitet werden können, unterliegen Spritzenkörper als Medizinprodukte nationalen Anforderungen. Die Zulassung wird in der Bundesrepublik Deutschland durch das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte reguliert. Das BfArM stellt eine (kostenpflichtige) nationale Datenbank DMIDS (BfArM 2023b) bereit, in denen Hersteller für Medizinprodukte recherchiert werden können. Hinzu kommt, dass die Herstellung von Kolbenspritzen nach DIN EN ISO-Norm 7886-1 auf Basis von Polyolefine-Granulat in einem fiktiven Krisenszenario durch eine Vielzahl von Produzenten realisiert werden könnte, die über eine entsprechende Anlagentechnik für Spritzgussverfahren und -formen, Skalendruck und Thermoformen mit entsprechenden Möglichkeiten zur anschließenden Sterilisierung verfügen. Um eine weltweite Verteilung der Produktionsorte zu generieren, wurden für die Spritzen

Produktionsstandorte der Sektoren „Healthcare“ und „Chemicals“ verwendet, die über die Initiative Open Supply Hub (Open Supply Hub 2023) veröffentlicht sind. Darauf aufbauend wurde die Hypothese abgeleitet, dass die Herstellung der Spritzen in Bangladesch, den USA oder in Ostchina loziert ist. Die zur Parametrisierung der Knoten verwendeten Referenzen sind im Abschnitt Zusätzliche Materialien tabelliert.

4.2 Simulationsergebnisse

Für die Validierung der zuvor generierten Datencontainer kam das Simulationswerkzeug OTD NETWORK („Order-To-Delivery-Network“) zum Einsatz. OTD NETWORK ist eine ereignisdiskrete Simulationsumgebung für die Modellierung, Simulation und Analyse von Lieferketten. Aufgrund seiner abstrakten, objektorientierten Strukturen lässt sich das Werkzeug in unterschiedlichen Branchen und für unterschiedliche Fragestellungen einsetzen (Liebler et al. 2013).

Um die Methodik der Datencontainer zu validieren, wurde die zuvor gezeigte Beispiel-Lieferkette (Abbildung 1: Vereinfachte Beispiellieferkette für den Rettungsdienst Abbildung 1) inklusive einer Disruption auf dem Seeweg zwischen dem Produzenten für ASS und dem Großhändler des Rettungsdienstes (Transport 9) im Simulationswerkzeug OTD NETWORK mit Hilfe von Datencontainern modelliert. Daten, die dem Rettungsdienst aufgrund seiner Lieferverträge mit dem Großhändler vorliegen, wurden hierbei ebenfalls mit einbezogen. So basieren beispielsweise die Lagerpolitiken des Großhändlers und des Rettungsdienstes auf den selbst definierten bzw. mit dem Händler vereinbarten Mindestbeständen und Bestandsreichweiten sowie den typischen Wiederbeschaffungszeiten. Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der vereinfachten Beispiel-Lieferkette und ihre Parametrisierung sowie die Quelle der Daten auf.

Mit Hilfe dieses Lieferkettenmodells wurden Simulationsläufe mit verschiedenen Parametervariationen durchgeführt. Aufgrund der Disruption verzögern sich die Seetransporte vom Produzenten ASS zum Großhändler des Rettungsdienstes erheblich und resultieren, wie im linken Teil der Abbildung 4 zu erkennen, in einem Versorgungsengpass. Der ASS-Bestand beim Großhändler nimmt stetig ab, unterschreitet den vertraglich festgelegten Mindestbestand und läuft aufgrund der verzögerten Lieferung für zehn Tage komplett leer. Zeitlich versetzt läuft auch das Lager des Rettungsdienstes, welches erheblich weniger Reservebestand vorhält, für zwei Tage leer.

Auf Basis dieser Prognose können frühzeitig resilienzsteigernde Maßnahmen eingeleitet werden. Beispielsweise können alternative Lieferanten identifiziert werden, um kurzfristig Ersatzlieferungen zur Überbrückung des Engpasses zu realisieren. Die im rechten Teil der Abbildung 4 dargestellte Bestandsprognose zeigt, dass durch den Einsatz eines Alternativlieferanten von ASS aus Frankreich der Engpass vermieden werden könnte.

Weiterhin ist es möglich, mit Hilfe einer szenarienbasierten Variation der Parameter (z.B. Dauer der Disruption) die Grenzen der Belastbarkeit der eigenen Lagerstrategie zu untersuchen und die gewählten Bestellparameter gegebenenfalls anzupassen. Bestandsverläufe mit unterschiedlichen Transportverzögerungsdauern können im Abschnitt Zusätzliche Materialien betrachtet werden.

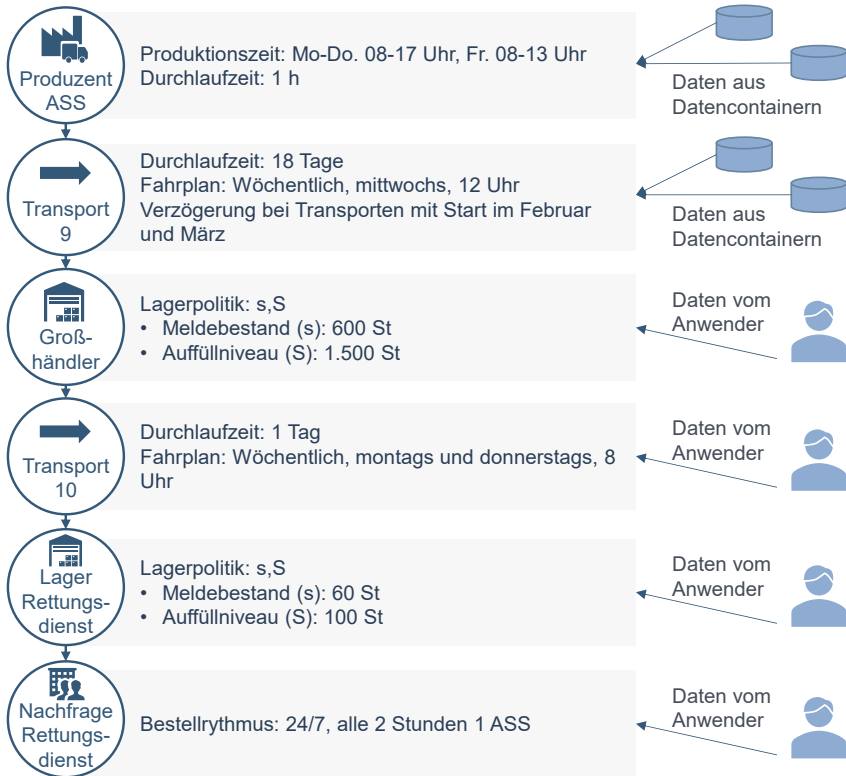


Abbildung 3: Auswahl verwendeter Prozessparameter

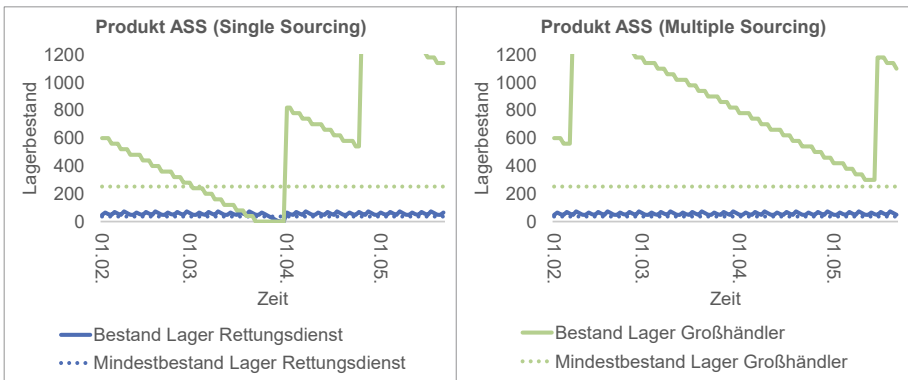


Abbildung 4: Verlauf des Lagerbestands für das Medikament ASS in Abhängigkeit der Sourcing-Strategien Single (links) und multiple Sourcing (rechts) über die Zeit.

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen beschriebenen Szenarien entsprechen dem unter Berücksichtigung der geplanten Mindestbestandsreichweiten zu erwartenden Lieferkettenverhalten. Die zuvor erarbeiteten Datencontainer haben sich dabei als ein praktikables Mittel erwiesen, um die sonst für Rettungsdienst

unbekannten Details ihrer Lieferketten im Modell zu ergänzen und so zu einer plausiblen Bestandprognose und Engpassanalyse zu gelangen.

4.3 Limitationen

Die Qualität der von OTD NETWORK erzeugten Simulationsergebnisse hängt in einem großen Maße von der Qualität der Modellparametrisierung ab. Diese inhärente Limitierung führt dazu, dass die Ergebnisse aus Simulationen von Lieferketten, die aus Datencontainern zusammengestellt wurden, stets mit besonderer Aufmerksamkeit beurteilt und validiert werden sollten. Datencontainer stellen eine methodische Synthese einer Vielzahl von Annahmen und Verallgemeinerungen dar. Damit werden, um den Preis der Präzision, Informationslücken mit Näherungen geschlossen. Eine Plausibilität kann ohne den Einbezug von Domänenexperten/-innen nicht gewährleistet werden.

Zudem ist das Erzeugen von Datencontainern mit hohem Rechercheaufwand verbunden und setzt teilweise hohes Domänenwissen voraus. Daraus ergibt sich ein trade-off zwischen Generalisierung und Spezialisierung. Datencontainer müssen spezifisch genug sein, damit die Simulation aussagekräftige Ergebnisse für ein konkretes Szenario berechnen kann. Sie sollten jedoch auch allgemein genug sein, damit sie für verschiedene Szenarien wiederverwendet werden können.

Simulationen erlauben eine gezielte Parametervariation und damit die Abbildung einer Vielzahl von Szenarien. Aufgrund der emergenten Eigenschaft komplexer Systeme, können strukturelle Änderungen im Modell sich auf alle Knoten und Kanten auswirken. Es ist daher ratsam, bereits im Modellierungsstadium in enger Abstimmung mit Domänenexperten/-innen alternative Pfade zu integrieren und diese ggf. mit weiteren Datencontainern zu charakterisieren.

5 Fazit

International vernetzte Versorgungslieferketten sind komplexe Systeme mit einer Vielzahl von Eigenschaften und Abhängigkeiten. Durch die daraus entstehenden Wechselwirkungen lassen sich Auswirkungen von Disruptionen auf die Versorgungssicherheit nur schwer voraussagen. Szenarienbasierte Lieferkettensimulation kann verwendet werden, um diese Abhängigkeiten systematisch zu analysieren und die Auswirkungen von Disruptionen rechtzeitig zu kompensieren.

Eine Voraussetzung für die Modellierung und Simulation von Lieferketten ist die Kenntnis über dessen Struktur und Prozessparameter. Insbesondere BOS fehlt dieses Wissen aufgrund ihrer Beschaffungsstruktur über Großhändler. Durch die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik der Datencontainer können fehlende Lieferkettendaten durch zuvor recherchierte Annahmen und Verallgemeinerungen ersetzt werden.

Auf diese Weise werden Anwender:innen mit unvollständigen Daten ermächtigt, Auswirkungen von Disruptionen auf die Versorgungssicherheit ihrer Organisationen zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Darüber hinaus können sie szenarienbasiert präventive Ansätze für die Erhöhung der Lieferkettenresilienz evaluieren. Somit leistet die entwickelte Methodik einen Beitrag zur Reduktion von Abhängigkeiten regionaler Akteure im bundesdeutschen Gesundheitssektor und der BOS von internationalen Lieferketten.

Bei dieser Methodik limitierend zu berücksichtigen ist der hohe Aufwand und das notwendige Domänenwissen zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Datencontainer. Eine Möglichkeit zur Auflösung dieser Problematik könnte die Bereitstellung einer Plattform zum Austausch von Datencontainern sein. So kann eine Bibliothek von Datencontainern zu verschiedenen Domänen erzeugt und bereitgestellt werden. Die direkte Integration der Datencontainer in bestehende Simulationssoftware könnte die Anwendung zusätzlich vereinfachen. Eine Voraussetzung für beides ist eine Standardisierung des Datenformats für Datencontainer.

Zusätzliche Materialien

Weiterführende Informationen, die zur Simulation verwendeten Modellparameter sowie die zur Parametrisierung genutzten Datencontainer werden dauerhaft und frei unter CC BY 4.0 Lizenz auf <https://doi.org/10.5281/zenodo.7871051> zur Verfügung gestellt.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „ResKriVer – Kommunikations- & Informationsplattform für resiliente krisenrelevante Versorgungsnetze“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Förderkennzeichen 01MK21006A und 01MK21006J).

Literatur

- AGNN e.V.: Therapieempfehlungen für die Notfallmedizin. Lübeck 2021.
- Akhavian, R.; Behzadan, A. H.: Automated knowledge discovery and data-driven simulation model generation of construction operations. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M. E. (Hrsg.): Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (WSC), Washington D. C. (USA), 8.-11. December 2013, S. 3030-3041.
- Bayer Vital GmbH: Information zur eingeschränkten Lieferfähigkeit von Aspirin i.v. 500 mg, Pulver und Lösungsmittel zur Herstellung einer Injektions- oder Infusionslösung, 2023. <https://media.gelbe-liste.de/documents/informationsbrief-zu-aspirin-i.v.-500-mg---m%C3%A4rz-2023.pdf>, letzter Zugriff 24.04.2023.
- Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM): Veröffentlichte Lieferengpassmeldungen, 2023a. <https://anwendungen.pharmnet-bund.de/lieferengpassmeldungen/faces/public/meldungen.xhtml>, letzter Zugriff am 08.02.2023.
- Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM): DMIDS - Deutsches Medizinprodukte- und Datenbanksystem, 2023b. https://auth.bfarm.de/auth/realms/wirk/login-actions/authenticate?client_id=MPI&tab_id=qNVL4bVnWKs, letzter Zugriff am 24.04.2023.
- Cope, D.; Fayez, M. S.; Mollaghasemi, M.; Kaylani, A.: Supply chain simulation modeling made easy: An innovative approach. In: Henderson, S. G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J. D.; Barton, R. R. (Hrsg.): Proceedings of the

- 2007 Winter Simulation Conference (WSC), Washington D.C. (USA), 9.-12. Dezember 2007, S. 1887-1896.
- European Department for the Quality of Medicines (EDQM): Certificate of Suitability of Monographs of the European Pharmacopoeia (CEP). Certification database, 2023. https://extranet.edqm.eu/publications/recherches_CEP.shtml, letzter Zugriff am 24.04.2023.
- European Medicines Agency: Das Europäische Arzneimittelregulierungssystem. Ein einheitlicher Ansatz für die Zulassung von Arzneimitteln in der Europäischen Union, 2016. https://www.ema.europa.eu/en/documents/leaflet/european-regulatory-system-medicines-european-medicines-agency-consistent-approach-medicines_de.pdf, letzter Zugriff 10.05.2023.
- Eekhout, I.; de Boer, M. R.; Twisk, J. W. R.; de Vet, H. C. W.; Heymans, M. W.: Missing Data: A Systematic Review of How They Are Reported and Handled. *Epidemiology* 23 (2012) 5, S. 729-732.
- Handfield R. B.; Graham, G.; Burns, L.: Corona virus, tariffs, trade wars and supply chain evolutionary design. *International Journal of Operations & Production Management* 40 (2020) 10, S. 1649-1660.
- Hermes, A.: Modellbasierte Bewertung von Potenzialen einer distributionsorientierten Programm- und Reihenfolgeplanung in der Automobilindustrie. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2011.
- Ivanov, D.: Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 136 (2020) 101922.
- Kagermann, H.; Süssenguth, F.; Körner, J.; Liepold, A.; Behrens, J. H.: Resilienz der Gesundheitsindustrien: Qualität und Versorgungssicherheit in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken. München: acatech IMPULS 2021.
- Larsen, R.: Akutes Koronarsyndrom (ACS) und akuter Myokardinfarkt. In: Larsen, R. (Hrsg.): *Anästhesie und Intensivmedizin für die Fachpflege*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016, S. 680–690.
- Lau, T.; Osterloh, F.: Lieferengpässe: Das fragile System der Arzneiversorgung. *Deutsches Ärzteblatt* 119 (2022) 19, S. 851-858.
- Liebler, K.; Beissert, U.; Motta, M.; Wagenitz, A.: Introduction OTD-NET and LAS: Order-to-delivery network simulation and decision support systems in complex production and logistics networks. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulations Conference (WSC)*, Washington D.C. (USA), 8.-11. Dezember 2013, S. 439-41.
- Oliveira, J. B.; Lima, R. S.; Montevechi, J. A. B.: Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory* 62 (2016), S. 166–191.
- Oliver, E.; Mazzuchi, T.; Sarkani, S.: A resilience systemic model for assessing critical supply chain disruptions. *Systems Engineering* 25 (2022) 5, S. 510–533.
- Open Supply Hub: Open Supply Hub (OS Hub) - an accessible, collaborative, supply chain mapping platform. <https://info.opensupplyhub.org/>, letzter Zugriff am 10.05.2023.
- Röhrig, S.; Rockel, T.: Analyse existierender Simulationsstudien zum Umgang mit fehlenden qualitativen Daten. *Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik* 4 (2020).

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Consolidation for Clothing Logistics in the German Armed Forces: A Simulation Analysis

Simulationsstudie zu Konsolidierungsstrategien für das Bekleidungsmanagement der Bundeswehr

Heiderose Stein, Tobias Uhlig, Daniel Seufferth, Oliver Rose,

Universität der Bundeswehr, Neubiberg (Germany),

heiderose.stein@unibw.de, tobias.uhlig@unibw.de, daniel.seufferth@unibw.de,
oliver.rose@unibw.de

Abstract: Having the right article in the right place at the right time is a logistical challenge – and can be vital. In this context, the Armed Forces of Germany (Bundeswehr) assess options to make the existing supply chain for protective attire more agile using online-shopping strategies. In this setting, the supply is internal to the organization: this allows for using of different consolidation strategies and applying customers' risk aversion strategies to the supplier in using preventive sending strategies. To explore different delivery strategies, a high-level simulation model is proposed. Results show that with the applied strategies, the delivery of fitting articles on time can be improved: preventive sending can help to have the right article in place at the time needed, and consolidation helps to reduce the number of packages sent.

1 Introduction

Soldiers' protection and readiness depend on their equipment and gear supply. Essentially, the Armed Forces of Germany need to guarantee timely delivery of fitting functional attire for their soldiers, which matches the respective area of operation. This entails an enormous logistical challenge. Therefore, they currently employ their own classical store system, where clients fetch their attire at given distribution centres. However, there is a growing interest in making this process more agile towards individual and urgent needs, inspired by e-commerce solutions. Thus, necessary items can be sourced anytime and delivered directly to the client. Not being bound to opening hours of shops comes at the price of not being able to fit the clothes – and therefore is a risk leading to a higher rate of wrong sized articles for a customer (see Zennaro et al. 2022; Abdulla et al. 2019). In this context, we aim to provide a high-level analysis to assess the impact of a new supply system for protective attire logistics

and evaluate strategies to ensure a timely supply. To this end, discrete event models are used to simulate various scenarios for potential implementations. This enables decision-makers to take an informed decision on improving the respective systems.

In the following section, an introduction to the context of this paper is given: the opportunities and challenges of e-commerce options for (protective) clothes in general as well as the special conditions of our use case. Additionally, an overview of relevant literature and simulation studies is given, focusing on shipment consolidation strategies and their implementation for supply at reasonable efforts. In the third section, the used model and implemented strategies will be described. The fourth section states the simulation scenario and parameters. The results of the initial experiments will be described in Section Five. The paper concludes with possible areas of development based on the first experimental results.

2 Context

In General, there is a growing interest in online shopping and Internet sales have increased dramatically over the past decade (Zennaro et al. 2022; Pedrielli et al. 2016). This offers convenience to customers like 24/7 shopping, and therefore an immediate requisition to new demands. Especially the second aspect is relevant for functional clothes, like medical or military gear, as it is vital to have medics and soldiers well-equipped when needed.

This trend challenges logistics, mainly in the fields of last-mile delivery and returns management. The last mile of delivery and returns drives socioeconomic costs (Zennaro et al. 2022). Problems in the last mile, i.e., the final shipment to the customers, are due to dispersed individual items and locations of the customers (Macioszek 2018). Return management is another issue: the number of returns in e-commerce is growing compared to classical stores (Abdulla et al. 2019; Zennaro et al. 2022), given the differences in the real product compared to the customers' expectations. Especially the textile industry faces challenges and opportunities in this setting and therefore explores digitalization opportunities (see Nobile et al. 2021; Seewald et al. 2019): for example, mobile applications have been developed to predict fitting sizes and prevent returns, with a focus on the fashion sector. For protective clothes, sizing differs based on the desired function. Therefore, a specific app has been developed (Oehlschäger et al. 2022), which can help to predict the correct size but may not prevent all returns of non-fitting apparel.

The use case described is intraorganizational, as both supplier and customer are part of the same organization. Therefore, both customers' and suppliers' needs are in focus. Hence, strategy evaluation may consider customers' risk-mitigating strategies as well as suppliers' strategies. Additionally, several customers are located at known sites where a storage place is accessible for deliveries at any time. Compared to standard cases, this allows the usage of interesting strategies to counteract transportation costs and return management due to shipment consolidation. Shipment consolidation, i.e., collecting several items into a single shipment (Ranathunga et al. 2021), is one strategy to reduce efforts in the supply chain and may significantly reduce sustainability costs in transport (Alnahhal et al. 2021; Romero-Silva and Mujica Mota 2022). Based on classifications from different authors (Romero-Silva and Mujica Mota 2022; Wei et al. 2021; Alnahhal et al. 2021; Memon et al. 2021;

Kang et al. 2017) shipment consolidation strategies can be organized into the following categories:

- Temporal consolidation strategies, which consolidate shipments over a certain period.
- Spatial consolidation strategies, which consolidate shipments by region or point of delivery.
- Product-based consolidation strategies, which consolidate different products into one shipment, based on economical or quantity consolidation.
- Hybrid consolidation strategies, combining two or more of these consolidation strategies.

Given the specific characteristics of the use case, three different strategies are implemented and compared to applying no strategy: First, with clients located in one place and a shared delivery hub, a hybrid, spatial-temporal consolidation strategy is implemented. This is addressing the orders from people located in the same area within a given timeframe of one day. As the equipment is needed at a certain date, and the main aim is delivery in time, any delay needs to be avoided: for example, late deliveries or returns. Thus, the preventive shipment of additional items in advance is implemented. This draws on the idea of consolidating shipments as well as on risk-mitigation strategies observed in online shoppers: Abdulla et al. 2019 state that online shoppers mitigate their risks by adding additional items to their basket and returning those that don't fit later. Yet, they observe scant literature addressing this topic and thus suggest developing theories for return policy design. Based on these ideas, we implement two preventive shipment policies to avoid downtime due to returns.

3 Methodology

This section describes the methodology used for modelling the new conceptual logistics system for the clothing management of the Bundeswehr. First, an abstract model of the fundamental ordering process is given. Then, the strategies for the consolidation of shipments and preventive packaging are explained in detail. Lastly, the first high-level model used for simulation is explained.

3.1 Abstract Model of the Order Processing and Shipment

The ordering process is modelled on an abstract level to investigate the main effects without a need to consider all the details. It is illustrated in Figure 1. The process starts with an order. For this paper it is assumed that all ordered goods are available, however, the option to consider backorders is included. With all goods available the next step is to pack everything into a parcel. This is the most important step of the model, since the packing process can change the behaviour significantly depending on the employed strategy. Here, the different consolidation approaches get applied, which will be discussed in detail in the following sections. After packing, the parcel will be sent, which is reflected by a timespan for the sending process. Upon arrival, consolidated shipments are immediately separated into individual orders, and unpacked by the customer. Then, the fit of all items gets checked. If any item does not fit, a reorder will be issued, and the respective item(s) will be returned. In this model, a reorder will always result in sending the correct size.

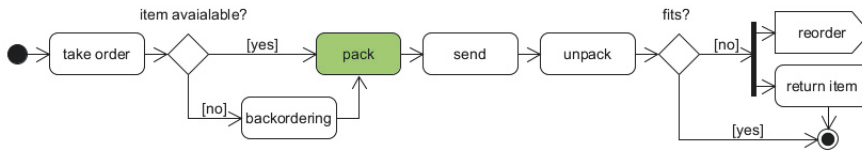


Figure 1: Scheme of order processing: The strategies become relevant in packing (marked green).

3.2 Implemented Strategies

In the following subsections, the implemented strategies will be discussed:

- A hybrid shipment consolidation strategy of items per individual and location hub and timeframe.
- Two preventive consolidation policies, to have everyone readily equipped at a given time using a shopping basket risk minimization approach.

These collections take place during packaging (see Figure 1 and Figure 2). Bundling orders for individuals, locations, and over a time frame allows for a more efficient shipment process, and preventive sending of additional articles allows for reducing delivery times for the right one, as stated in Section 2. As the focus is on fast delivery, shipping restrictions like packaging size, transportation mode and sustainability considerations are not yet included in this initial investigation.

3.2.1 Consolidation of Shipments per Location Hub

The use-case allows for employing shipment consolidation strategies based on the characteristics, that several people are located within one region and use a shared delivery hub. Additionally, orders are processed every day in the next warehouse and package restrictions are negligible, as there are several modes of transportation possible. These prerequisites would not all be viable for mail-order retailers or big e-commerce companies. To exploit the characteristics and assess their impact, the three following consolidation strategies are implemented in this first high-level model:

1. Temporal collection over a time window of one day.
2. Local collection within this timeframe per individual, i.e., one soldier.
3. Local collection of orders and returns within this timeframe and individuals in one location hub.

3.2.2 Preventively Consolidating Shipments with Additional Items

The main aim is to achieve on-time delivery of the right article. Adding additional items, when there is uncertainty that the right article is included, may help; this is the base of the preventive sending strategies, *PreSend* and *PreSendAbundant*. To this end, we want to minimize the number of deliveries that do not fit the customer, to avoid the need to resend other sizes of an item. To enable this, a predictor is needed that estimates a fit probability for a given size of clothing. This prediction can be based on historic data or body measurements. The Bundeswehr currently evaluates the use of a mobile app to measure the body of soldiers (Oehlschläger et al. 2022). Using this data, a digital twin with all relevant body measurements is generated for each soldier. With

this prediction model, an estimate, of how likely a certain size of clothing will fit, can be calculated. The *PreSend* strategy simply adds an additional size for each item that exceeds a given threshold of fit uncertainty. The strategy operates under the assumption that the correct size is always between two sizes. Accordingly, if one size does not fit, the other size is the correct one. More complex scenarios with uncertainty between more than two sizes are ignored. As parcel size limitations are not relevant in this initial investigation, the *PreSend* strategy can easily be extended to the more generous concept *PreSendAbundant*. In this strategy when at least one item in an order has a fit uncertainty exceeding the threshold, two sizes for each item of the order are packed. Since already one additional item leads to a return parcel, ignoring packaging restraints and sustainability considerations more sizes can be included to further minimize the risk of one item not fitting.

3.3 Entities of the Model

Based on the abstract ordering process, the model visualized in Figure 1 is built as a discrete event model using the software *Anylogic*, employing the described strategies. The entities and parameters of the model are described in greater detail in the following subsections: items, orders, location hubs, and warehouses.

3.3.1 Item

The items represent the articles an individual soldier can order. It is characterized by three parameters: an ID, a name, and the fit probability of the item. The first two parameters are trivial and used to distinguish between different items. The fit probability implements the prediction probability of the app, introduced in (Oehlschläger et al. 2022), and gives the probability, of whether the correct size of the item is ordered or not. To represent one individual ordered item, with the measured and actual size of the article for that individual, a class *OrderItem* is used. The class provides functions and parameters that keep track of the measured size, the correct size, the fit probability, and if two sizes are shipped when using a preventive sending strategy. The measured size gets set during order creation and is based on the fit probability, meaning that an item with a fit probability of 60 % will be measured correctly 60 % of the time it gets ordered.

3.3.2 Order

The order represents what items one individual orders at that time and holds a list of all the items. The order follows the steps of the order process depicted in Figure 1, and it may be expanded by additional items in the pack-subprocess. For consolidating multiple orders into a shipment, a container *CollectiveOrder* is created, which is only used during sending.

3.3.3 Location Hub

The orders are created in the location hubs, as this is where the individuals reside. There are three different configurations of order creation, like basic swaps of old clothing, conversions to a different tactical uniform, or a complete initial order for one location hub. These three order creation methods differ in the number of orders they create and the interval they get executed. This leads to changing numbers of orders in the system and seasonal effects. The location hubs have different parameters needed for order creation to implement fluctuations in the number of items in one order.

Furthermore, every location hub has a given number of personnel that is used to determine the number of orders created for the three different order configurations.

Though in this first high-level model, only one location hub is implemented, the agent is tailored to easily be scalable, so a multitude of different sites with different geographical locations can be implemented in a more detailed model.

3.3.4 Warehouse

The warehouse is where the order processing visualized in Figure 1 takes place. Orders arrive from the location hub and follow the different process steps, depicted in Figure 1. The *pack* process is expanded with the two strategies for order consolidation and preventive sending. A detailed view of the *pack* process implemented is given in Figure 2.

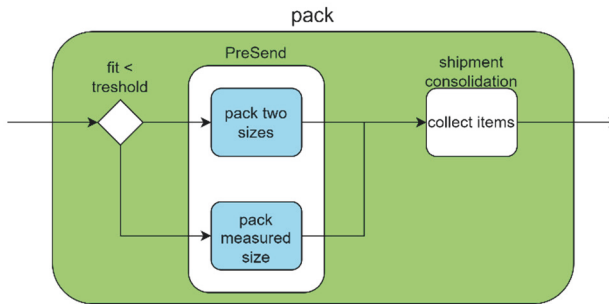


Figure 2: Packing process with implemented strategies for order consolidation and preventive sending.

4 Simulation Scenario and Parameters

This section describes the simulation scenario and the parameters used to explore the effect of the implemented strategies. To assess different settings, the performance metrics defined with the subject matter experts are described as well.

The scenario spans a year, where each individual soldier, orders several items stochastically over the year. Assumptions on the system are derived from discussions with experts and are exemplary: this includes the number of items ordered per individual, the item characteristics, the timeframe for collection, and the realistic delivery time of an order.

The goal of the simulation experiment is to get an understanding of the system and the different pack strategies, to assess the following:

- capacities needed for changing the system, i.e., the number of items and shipments that need to be sent based on the assumptions, and how different strategies impact them.
- delivery times needed for having the right item in place, and how different strategies impact them.

As a base reference, the number of items to ship without any consolidation strategy within any experiment is used. Parameters to change are the number of persons per

location hub as well as forecasting probabilities for the item fit, based on the app or historical data, to understand how to use them to relieve the system.

5 Results

To evaluate the different strategies, the performance of the system regarding our aim is assessed. Different evaluation criteria for measuring performance are stated in the literature (see Alnahhal et al. 2021; Ma et al. 2020; Pedrielli et al. 2016; Kang et al. 2017). To evaluate the delivery times needed, lead times from order to delivery are calculated per simulation run.

To evaluate the capacity of the system, the number of sent items (separated into delivery and return), the number of sent shipments (where shipments can contain several items), and the mean number of items per shipment are calculated per simulation run. The number of sent items is used as a reference for each scenario, as this indicates the maximum number of shipments if no consolidation strategy is applied.

Results on artificial scenarios indicate that the strategies are successful: First, the number of shipments can be decreased, using shipment consolidation as illustrated in Figure 3. With more persons at one location, the number of items rises linearly, whereas the number of shipments is limited to one per day – as shipment sizes are unlimited in the initial model. This leads to shipments including growing numbers of items with more persons in one location hub.



Figure 3: The mean number of items (coral) and parcels (turquoise) sent within 10 simulation runs are visualized.

Second, the waiting time for the right item can decrease using a preventive sending strategy, as visualized in Figure 4. Here, the following scenarios are compared:

- *base* – a scenario, where no redundant items with different sizes are sent, is the base reference: shipment consolidation is ignored, i.e., one parcel contains one order. The following scenarios extend this base scenario.
- *85 pre*, *95 pre* – a scenario, where items with a predicted fit that is lower than a certain threshold, here 85 % and 95 % respectively, are sent twice (following the “PreSend”-strategy).
- *85 preA* – a scenario, where a complete order containing one item with a predicted fit that is lower than a certain threshold, here 85 %, is sent twice (following the “PreSendAbundant”-strategy).
- *pack2* – a scenario, where two sizes are sent for each item is the reference for the maximum number of items that need to be transported.

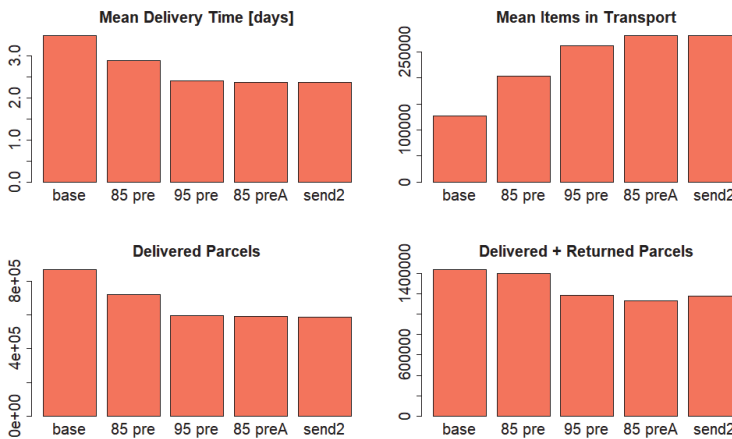


Figure 4: Summary statistics for different pre-sending strategies.

As expected, the mean number of items in transport, not including returned items, rises when choosing higher thresholds or a more aggressive preventive sending strategy, while the number of parcels sent can decrease due to the applied shipment consolidation and the absence of packaging size restrictions. The mean delivery time for the fitting item can be reduced by applying a preventive sending strategy. Interestingly, the number of parcels sent is also reduced by using the *PreSend* strategy. This indicates that the additional parcels required to return additional sent sizes are out weight significantly by the lower number of reorders for non-fitting items.

6 Summary and Further Research

Within this work, we implemented a first high-level discrete event simulation model to explore different strategies to guarantee timely delivery of items for a supply system. These strategies are based on shipment consolidation and meet the specific characteristics of the use case in employing a hybrid collection of items over a timeframe per individual and location hub and pre-sending strategies to avoid missing articles due to delivering wrong sizes. Initial experiments revealed, that applying the

strategies can decrease the number of shipments as well as the delivery time of the right article.

For further exploration of strategies and their impacts, we intend to implement additional strategies and assessments for both sent and returned items: First, the option to decide on different transportation modes based on the size of collections and time constraints (see Huang et al. 2020; Romero-Silva and Mujica Mota 2022). We want to implement this in a hybrid DES-agent-based model to address shipment constraints due to shipment mode, as collections are limited in size and different modes of transportation or different dispatching rules are to be considered to evaluate whether to use external services or a transporter fleet. Second, the option to combine the first mile of return with the last mile of delivery for further scenario analysis (compare Ranathunga et al. 2022). To make decisions in the current model smarter, we can use approaches to learn what items to pool or predict patterns (see Pedrielli et al. 2016). To address not only the flexibility gained with these strategies, including an assessment of their resilience is another interesting research idea.

To make the model more realistic, several of the simplifications can be addressed. For example, the transport restrictions and effects can be modelled in greater detail and allow for an analysis of the efforts needed. Additionally, the model already includes different fit probabilities for different items - in future developments, this can be expanded by the differentiation between these items to address the problem regarding different products and different collection strategies among different products. To address individual behaviour, multiple profiles for persons that differ in their return behaviour can be included (see Abdulla et al. 2019). Additionally, warehouse and inventory considerations in the model will be implemented in the long term.

Acknowledgements

This research is part of the project LogSimSanDstBW and is funded by dttec.bw - Center for Digitization and Technology Research of the Bundeswehr. dttec.bw is funded by the European Union - NextGenerationEU.

References

- Abdulla, H.; Ketzenberg, M.; Abbey, J.D.: Taking stock of consumer returns: A review and classification of the literature. *Journal of Operations Management* 65 (2019) 6, pp. 560–605.
- Alnahhal, M.; Ahrens, D.; Salah, B.: Modeling freight consolidation in a make-to-order supply chain: A Simulation Approach. *Processes* 9 (2021) 9.
- Huang, Q.; Ohmori, S.; Yoshimoto, K.: Incorporating transportation mode decisions into production-shipping planning: Considering shipping consolidation. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal* 14 (2020) 1, pp. 62–72.
- Kang, K.; Ki-sung, H.; Kim, K.H.; Lee, C.: Shipment consolidation policy under uncertainty of customer order for sustainable supply chain management. *Sustainability* 9 (2017) 9, without page numbers.
- Ma, K.; Thomassey, S.; Zeng, X.: Development of a central order processing system for optimizing demand-driven textile supply chains: a real case based simulation study. *Annals of Operations Research* 291 (2020) 1, pp. 627–656.

- Macioszek, E.: First and last mile delivery – Problems and issues. In: Sierpiński, G. (Hrsg.): *Advanced Solutions of Transport Systems for Growing Mobility*, 2018, pp. 147–154.
- Memon, M.A.; Shaikh, A.; Sulaiman, A.; Alghamdi, A.; Alrizq, M.; Archimède, B.: Time and quantity based hybrid consolidation algorithms for reduced cost products delivery. *Computers, Materials, & Continua* 69 (2021) 1, pp. 409–432.
- Nobile, T.H.; Noris, A.; Cantoni, L.; Kalbaska, N.: A review of digital fashion research: before and beyond communication and marketing. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education* 14 (2021) 3, pp. 293–301.
- Oehlschläger, D.; Weiße, M.; Bagge, C.; Zimmermann, C.; Glas, A.H.; Holtmannspötter, J.; Essig, M.: Testing a smartphone application for the optimisation of organisational outfitting procedures for protective clothing. In: D'Apuzzo, N. (Eds.): *Proceedings of 3DBODY.TECH 2022 - 13th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies*, Lugano, Switzerland, October 25th-26th 2022, without page numbers.
- Pedrielli, G.; Vinsensius, A.; Chew, E.P.; Lee, L.H.; Duri, A.; Li, H.: Hybrid order picking strategies for fashion e-commerce warehouse systems. In: Theresa M.K. Roeder, Peter I. Frazier, Robert Szechtman, Enlu Zhou, Todd Huschka, and Stephen E. Chick (Eds.): *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, Washington, DC (USA) December 11th-14th 2016, 2016, pp. 2250–2261.
- Ranathunga, M.; Wijayanayake, A.N.; Niwunhella, D.: Solution approaches for combining first-mile pickup and last-mile delivery in an e-commerce logistic network: A systematic literature review. In: *2021 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, Colombo (Sri Lanka), September 16th 2021, 2021, pp. 267–275.
- Ranathunga, M.; Wijayanayake, A.N.; Niwunhella, D.: Simulation-based efficiency assessment of integrated first-mile pickup and last-mile delivery in an e-commerce logistics network. In: *2022 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, Colombo (Sri Lanka), September 1st 2022, 2022, pp. 246–253.
- Romero-Silva, R.; Mujica Mota, M.: Trade-offs in the landside operations of air cargo hubs: Horizontal cooperation and shipment consolidation policies considering capacitated nodes. *Journal of Air Transport Management* 103 (2022), pp. 102253.
- Seewald, A.; Wernbacher, T.; Pfeiffer, A.; Denk, N.; Platzer, M.; Berger, M.; Winter, T.: Towards minimizing e-Commerce returns for clothing. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Prague, Czech Republic, February 19th-21st 2019, 2019, pp. 801–808.
- Wei, L.; Kapuscinski, R.; Jasin, S.: Shipping consolidation across two warehouses with delivery deadline and expedited options for e-commerce and omni-channel retailers. *Manufacturing & Service Operations Management* 23 (2021) 6, pp. 1634–1650.
- Zennaro, I.; Finco, S.; Calzavara, M.; Persona, A.: Implementing e-commerce from logistic perspective: Literature review and methodological framework. *Sustainability* 14 (2022) 2, pp. 911.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Optimierung einer stochastischen MRP-Simulation unter Anwendung der Bayes'schen Optimierung

Optimization of a Stochastic MRP Simulation Using Bayesian Optimization

Philipp Zmijewski, Nicolas Meseth, Hochschule Osnabrück, Osnabrück (Germany),
philipp.zmijewski@hs-osnabrueck.de

Abstract: This paper explores whether the Bayesian optimization algorithms GPEL, TurBO and SAASBO are effective for stochastic material requirements planning simulations. It includes a comparison of other methods, with a focus on the convergence speed, a key factor in simulation-based optimization. The study uses a simple material requirement planning simulation model that is progressively expanded in complexity by adding products and levels to the bill of materials. This results in a high-dimensional optimization problem, which poses a significant challenge for simulation-based optimization. The Bayesian optimization methods are compared at each level of complexity to determine if they produce satisfactory results. Additionally, the convergence speed is analyzed in relation to method and complexity. A genetic algorithm, CMA-ES, and Sobol serve as benchmarks for the Bayesian optimization methods.

1 Problemstellung und Motivation

Die Materialbedarfsplanung ist eine gängige Methode in der Produktions- und Bestandsplanung. Die Methode beruht auf gegebenen Bedarfen für Endprodukte. Durch die Stücklistenauflösung werden zu bestellende oder zu produzierende Sekundärbedarfe für jede Periode ermittelt. In der Praxis kann es vorkommen, dass diese Bedarfe durch etwa verspätete Lieferungen oder mangelnde Qualität bei der Anlieferung nicht vollständig gedeckt werden. Stochastische Simulationen können diese Unsicherheit adressieren und bei der Planung berücksichtigen. Innerhalb der Simulation werden dazu Parameter wie Sicherheitsbestand oder Bestellvorlaufzeit für jedes Produkt festgelegt, um etwaige Ausfälle oder Verzögerungen zu kompensieren. Die Ermittlung der optimalen Parametrisierungen für jedes Produkt ist eine anspruchsvolle Aufgabe und für menschliche Planer nicht leistbar. Das gilt umso mehr, wenn viele Produkte geplant werden müssen, da mit jedem zusätzlichen Produkt die Anzahl der festzulegenden Parameter steigt. Um den Planer zu

unterstützen, können Simulationen in Kombination mit Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden. Es wird dabei von der simulationsbasierten Optimierung gesprochen. Gegenwärtig werden in diesem Kontext vorwiegend evolutionäre oder genetische Algorithmen verwendet (Amaran et al., 2016; Damand et al., 2022; Nguyen et al., 2014; Werth et al., 2023). Diese eignen sich gut zur Lösung unterschiedlicher Problemstellungen, weisen aber, verglichen mit Verfahren der Bayes'schen Optimierung (BO), eine geringere Konvergenzgeschwindigkeit auf (Bull, 2011). Die Anzahl der benötigten Evaluationen (hier: Simulationsläufe) zur Erreichung eines befriedigenden Ergebnisses ist bei diesen Verfahren deshalb verhältnismäßig hoch (Bull, 2011). Insbesondere bei rechenintensiven Simulationen mit langer Laufzeit kann das problematisch sein.

Es gibt einige Publikationen, die sich mit der Optimierung von MRP-Simulationen befassen. Im Folgenden werden Auszüge genannt, die auf die Optimierung mit sequentiellen Algorithmen abzielen. Die Autoren Werth et al. (2023) und Damand et al. (2022) behandeln den Mehrzielfall mit jeweils unterschiedlichen Zielgrößen und verwenden dabei den NSGA-II Algorithmus, einen evolutionären Algorithmus für hochdimensionale Mehrzielprobleme. Beide erzielen damit zufriedenstellende Ergebnisse. Damand et al. (2022) fokussiert dabei speziell das Demand-Driven Material Requirements Planning, eine Weiterentwicklung des klassischen MRP. Die zu optimierenden Parameter variieren je nach Publikation, oft werden jedoch der Sicherheitsbestand, die Bestellvorlaufzeit sowie die Losgröße optimiert (Damand et al., 2022; Gansterer et al., 2014; Werth et al., 2023). Die vorliegende Studie optimiert die Parameter Sicherheitsbestand und Bestellvorlaufzeit pro Material mit dem Ziel der Kostenminimierung. Zur Anwendung von BO-Algorithmen auf diese Art von MRP-Simulation ist den Autoren keine Publikation bekannt.

2 Methodik

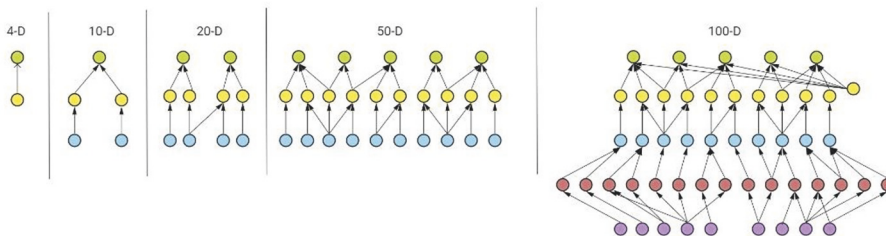


Abbildung 1: Gozinto-Graph der geplanten Stücklisten der Experimente. Aufsteigend sortiert nach der Anzahl der Dimensionen (D). Pro Knoten gibt es zwei Parameter

Um den ersten Teil der Forschungsfrage nach der Eignung der Bayes'schen Optimierung für die Anwendung auf stochastische Materialbedarfsplanungssimulationen zu beantworten, wird die Komplexität der Simulationsmodelle schrittweise erhöht und geprüft, wie die Algorithmen abschneiden. Dies geschieht zum einen durch die Hinzunahme von Produkten und zum anderen durch die Vertiefung der Stücklisten um zusätzliche Ebenen (Abbildung 1). Die Ergebnisse der Algorithmen werden auf jeder Komplexitätsstufe relativ

zueinander verglichen, da ein absoluter Vergleich hinsichtlich der Kosten aufgrund des unbekanntem Optimums unmöglich ist.

Für den zweiten Teil der Forschungsfrage hinsichtlich einer möglichen verbesserten Konvergenzgeschwindigkeit sollen ausgewählte Algorithmen aus der Familie der Bayes'schen Optimierungsverfahren mit dem CMA-ES-Algorithmus (Hansen, 2016) als einem gegenwärtig etablierten Verfahren verglichen werden. Zusätzlich wird die Sobol-Sequenz (Sobol', 1967) als Random-Search-Verfahren in den Vergleich einbezogen. Insgesamt werden für die Experimente in diesem Vorhaben folgende Verfahren betrachtet: GPEI (Frazier, 2018), SAASBO (Eriksson and Jankowiak, 2021), TuRBO (Eriksson et al., 2019), CMA-ES und Sobol'.

2.1 Bayes'sche Optimierung

Die Bayes'sche Optimierung (BO) ermöglicht eine stichprobeneffiziente Optimierung stochastischer und kostspieliger (hier: zeitaufwändiger und rechenintensiver) Black-Box-Funktionen. Dabei geht BO sequentiell vor, um neue vielversprechende Parametrisierungen basierend auf dem aktuellen Informationsstand vorzuschlagen. Die Parametrisierungen werden durch das Simulationsmodell evaluiert und samt Ergebnis dem Informationsstand hinzugefügt. Um das Verfahren zu beschleunigen, können pro Iteration mehrere Parametrisierungen vorgeschlagen werden. Die Optimierung ist beendet, wenn das zuvor definierte Evaluationsbudget erschöpft ist oder zuvor ein befriedigendes Ergebnis gefunden wurde. Es handelt sich bei BO um eine stochastische, heuristische Optimierungsmethode (Balandat et al., 2020; Frazier, 2018).

BO gilt bei einigen Black-Box-Problemstellungen als Stand der Technik, wie etwa dem Hyperparametertuning von Algorithmen des Maschinellen Lernens (u.a. Shahriari et al., 2016). Black-Box-Probleme sind auch in anderen Disziplinen, wie dem Werkstoffdesign (Zhang et al., 2020) und der Robotik (Berkenkamp et al., 2020) bekannt und können dort ebenfalls mit BO adressiert werden. Simulationen können ebenso als eine Black-Box betrachtet werden und weisen zusätzliche Eigenschaften auf, die Fragen für die Optimierung aufwerfen. So verfügen Simulationsmodelle oft über gemischte Parametertypen (kontinuierlich und diskret), Mehrzielproblematiken oder eine hohe Dimensionalität. Diese Charakteristika können durch diverse Algorithmen aus der Familie der Bayes'schen Optimierung adressiert werden (Daulton et al., 2021; Eriksson et al., 2019; Zhang et al., 2020). Die vorliegende Studie untersucht die Anwendung ausgewählter BO-Algorithmen auf stochastische, hochdimensionale MRP-Simulationen mit ganzzahligen Parametern.

2.2 Parametrisierung der Algorithmen und Experimentdesign

Das Verhalten und damit das Optimierungsergebnis jedes der genannten Verfahren kann über die Festlegung verschiedener Hyperparameter beeinflusst werden. Die systematische Veränderung der Hyperparameter ist Teil des Experimentierplans und der Einfluss der Hyperparameter auf den besten gefundenen Wert sowie die Konvergenzgeschwindigkeit wird auf jeder Komplexitätsstufe untersucht. Aufgrund der kombinatorischen Zunahme an benötigten Experimenten wurde nur ein Hyperparameter, das Evaluationsbudget, angepasst. Ein zweiter BO-Hyperparameter, die Anzahl an zufälligen Initialisierungspunkten, ist mit 20 % des Budgets festgelegt. Für das Evaluationsbudget wurden 6 Abstufungen gewählt: 40, 100, 200, 300, 500 und 1000 Evaluationen. Die Budgets wurden festgesetzt, um Limitationen, wie sie in

der Praxis gegeben sein können, abzubilden. Der Initialisierungsanteil wurde fixiert, um diesen über alle Budgets proportional zu halten. Alternativ hätte er in Abhängigkeit der Dimensionalität definiert werden können. Für die Hyperparameter der Algorithmen wurden Standardwerte aus der oben genannten Literatur verwendet. Jedes Experiment stellt folglich eine Kombination aus dem Modell (Komplexitätsstufen), dem Optimierungsverfahren, und dem Evaluationsbudget dar. Aufgrund der Stochastik sowohl im Simulationsmodell als auch in den Optimierungsverfahren (u.a. zufällige Parametrisierungen für die Initialisierung) müssen die Experimente mehrfach durchgeführt werden. Es wurden pro Experiment mindestens 15 Replikationen durchgeführt. Aufgrund spezifischer Verhaltensweisen der Algorithmen kann das Evaluationsbudget punktuell geringfügig überschritten werden. Es ist anzumerken, dass die Algorithmen das verfügbare Evaluationsbudget nicht kennen und sich unabhängig davon verhalten. So ist es nicht der Fall, dass ein Algorithmus etwa mehr exploriert, wenn ein höheres Budget zur Verfügung steht. Die Bayes'schen Algorithmen arbeiten sequenziell. Pro Sequenz (im Verlauf Trial genannt) wurden $n=1$ Parametrisierungen generiert und evaluiert (im Verlauf Arm genannt). Bei CMA-ES gilt $n=2$, da $n=1$ technisch nicht möglich ist. Es ist bekannt, dass CMA-ES mit zunehmendem n einen höheren Explorationsgrad erreicht. Da vorab keine sinnvolle Annahme aufgestellt werden konnte, wurde der Wert, wie bei den anderen Algorithmen, auf das Minimum gesetzt. Sobol generiert alle Parametrisierungen auf einmal, erst dann werden diese evaluiert.

2.3 MRP-Simulation

Die MRP-Simulation besteht aus zwei Komponenten: dem Solver und der Simulation. Der Solver ist eine Python-Implementierung des klassischen MRP-Algorithmus, einschließlich der Stücklistenauflösung und der Terminierung (Stadtler et al., 2015). Die Eingabewerte für den Solver sind die Stückliste, Bestellmengen pro Periode, Lieferzeiten und Parameter für jedes Produkt. Die Ausgabe des Solvers sind die terminierten Bedarfe für alle Materialien, die als Eingabegrößen für die Simulation dienen. Bis hierhin ist der Prozess deterministisch.

Die Simulation berechnet u.a. die Lagerkosten für die terminierten Bedarfe sowie die Lieferbereitschaft (Service Level) der zugrundeliegenden Bestellungen. Sie wird durch verspätete Anlieferungen und Mindermengen stochastisch beeinflusst. Beiden stochastischen Einflüssen liegen diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugrunde. Da die verwendeten Algorithmen nur eine Zielgröße optimieren können, wurden Strafzahlungen für nicht vorrätige Mengen implementiert. Diese werden pro Stück und Periode erhoben und ermöglichen somit eine Monetarisierung der Lieferbereitschaft. Der Ausgabewert der Simulation sind die Kosten, die sich aus den Lagerkosten und Strafzahlungen zusammensetzen, sowie das berechnete Service-Level. Letzteres wird zur Plausibilisierung herangezogen und geht nicht in die Optimierung ein.

3 Ergebnisse

Tabelle 1: Beste Kostenwerte, Median und Anzahl der Experimentwiederholungen pro BOM für alle Algorithmen und Budgets

BOM	Kennzahl	Sobol	GPEI	TurBO	CMA-ES	SAASBO
4	Min.	17.032	12.984	14.392	13.381	13.960
	Median	25.164	21.367	18.085	21.299	16.903
	n	190	167	166	171	40
10	Min.	37.933	38.203	34.621	35.829	36.013
	Median	47.197	45.836	43.616	47.418	41.250
	n	255	294	234	150	10
20	Min.	44.554	38.906	36.627	36.440	34.799
	Median	53.178	52.376	47.468	49.154	40.393
	n	150	110	110	130	17
50	Min.	190.086	193.818	166.340	184.991	-
	Median	239.926	233.201	239.658	277.536	-
	n	115	115	130	120	0
100	Min	378.105	300.594	238.459	284.882	-
	Median	1.257.125	610.017	572.873	751.689	-
	n	131	114	115	90	0

Tabelle 1 zeigt das absolute gefundene Kostenminimum über alle Experimentwiederholungen, den Median der besten gefundenen Kosten jeder Experimentwiederholung, sowie die Anzahl der Experimentwiederholungen für jede BOM und alle untersuchten Algorithmen. Bei den drei kleinsten Probleminstanzen (4, 10 und 20 Dimensionen) finden SAASBO und TurBO im Median die niedrigsten Kosten. Bei 50 Dimensionen findet TurBO zwar den niedrigsten Wert, ist im Median aber nur marginal besser als Sobol. GPEI findet hier die besten Werte. CMA-ES ist leicht abgeschlagen. Bei 100 Dimensionen dominiert TurBO beim besten Wert und im Median. CMA-ES findet zwar den zweitbesten Wert, ist im Median aber höher als TurBO und GPEI. Die Ergebnisse von Sobol sind signifikant schlechter.

Die unterschiedliche Anzahl an Replikationen ist darauf zurückzuführen, dass anfangs für jedes Experiment 15 Replikationen als Mindestanzahl durchgeführt wurden, mit Ausnahme von SAASBO. Auf die Gründe wird in der Diskussion eingegangen. Anschließend wurden bedarfsweise weitere Replikationen veranlasst. Hierbei wurde keiner Systematik gefolgt.

3.1 Verteilung der Kosten über alle Replikationen (BOM 20)

Abbildung 2 zeigt die aggregierten Ergebnisse aller Algorithmen für die 20-Dimensionen Probleminstanz (BOM 20). Diese wurde ausgewählt, da sich die Aussagen mit denen der anderen Instanzen weitestgehend decken und so Redundanzen vermieden werden. 20 Dimensionen gelten zudem als weiche Obergrenze des GPEI-Algorithmus (Frazier, 2018). Die entsprechenden Analysen für die anderen Komplexitätsstufen können auf der Webseite des Beitrags mit ergänzendem Material eingesehen werden.

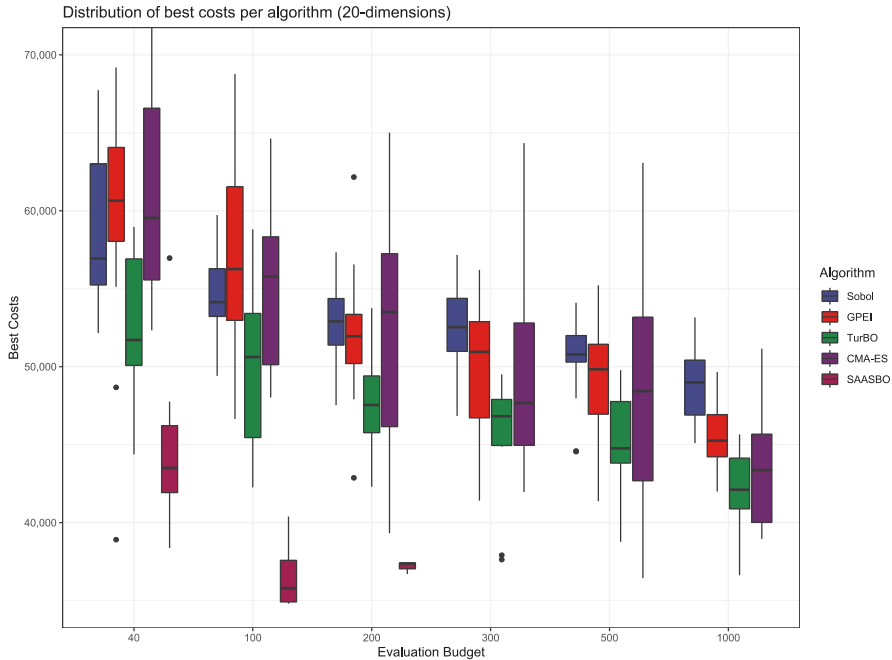


Abbildung 2: Box-Plots der kleinsten gefundenen Kosten über n Replikationen der BOM 20 pro Algorithmus und Budget mit den 25%- und 75%-Quantilen. Pro Algorithmus und Budget gilt $n=15$; Ausnahme SAASBO, dort gilt für Budget 40: $n=10$, 100: $n=2$, 200: $n=3$, Rest $n=0$

Auf der y-Achse sind die kleinsten gefundenen Kosten abgetragen. Auf der x-Achse die Budgetgrößen. SAASBO hat, wo vorhanden, im Median die Parametrisierungen für die niedrigsten Kosten identifiziert. Dahinter folgt TurBO. GPEI und CMA-ES sind bei kleineren Budgets hinsichtlich des Medians nicht oder nur geringfügig besser als die Sobol-Parametrisierungen. Bei höherem Budget erreichen sie bessere Ergebnisse. CMA-ES weist eine hohe Streuung innerhalb der Replikationen auf, wobei diese erwartungsgemäß mit höherem Budget sinkt. Dies kann unter Umständen durch die Stagnation in lokalen Minima erklärt werden, was aus dem zuvor erwähnten, geringen Explorationsfaktor resultieren kann.

3.2 Konvergenz über alle Budgets und Algorithmen

Abbildung 3 vergleicht die geglätteten Konvergenzkurven über alle Experimentwiederholungen für jeden Algorithmus. Die Konvergenzkurve zeigt den jeweils niedrigsten Kostenwert zum Stand des jeweiligen Arms. Die gestrichelte vertikale Linie kennzeichnet das Sobol-Initialisierungsbudget der BO-Algorithmen. Für SAASBO liegen nur Daten der Budgets 40, 100 und 200 vor. In diesen Fällen dominiert der SAASBO-Algorithmus deutlich. Ansonsten erzielt TurBO die besten Konvergenzen. Nennenswert ist, dass Sobol ähnliche Konvergenzen wie GPEI und CMA-ES aufweist.

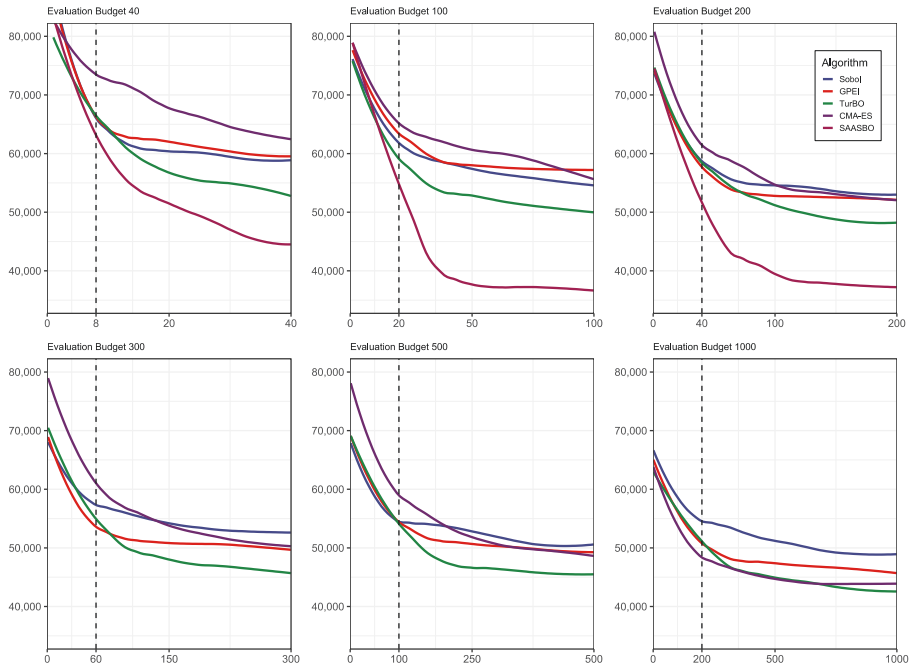


Abbildung 3: Geglättete Konvergenzen der Algorithmen für BOM 20 über alle Replikationen. Die gestrichelte Linie markiert die Initialisierung der BO-Algorithmen. Pro Algorithmus und Budget $n=15$; Ausnahme SAASBO, dort Budget 40: $n=10$, 100: $n=2$, 200: $n=3$, Rest $n=0$

4 Diskussion

4.1 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus Kapitel 4 eingeordnet werden. Es konnte gezeigt werden, dass TurBO und SAASBO die anderen Algorithmen hinsichtlich Ergebnis und Konvergenz dominieren. Dieser Effekt schwindet mit zunehmendem Budget.

Alle untersuchten Algorithmen finden bei zunehmendem Budget zuverlässig bessere Werte. Teilweise schneiden die Optimierungsalgorithmen GPEI und CMA-ES nicht wesentlich besser ab als Sobol. Dies ist unter anderem dadurch zu erklären, dass GPEI ab 20 Dimensionen Verluste in der Modellierungsgüte ausweist (Frazier, 2018), CMA-ES ein hohes Budget erfordert (Hansen, 2016) und Sobol bei diskreten, ganzzahligen Parameterräumen, verglichen mit kontinuierlichen, tendenziell bessere Ergebnisse erzielt. Die auffällig guten Ergebnisse von SAASBO gilt es vor dem Hintergrund des höheren Rechenaufwandes (Zeit und Ressourcen) zu betrachten. SAASBO benötigte exemplarisch bei der BOM 20 und dem 200. Arm auf hochmoderner Hardware über 10 Minuten für einen Trial. GPEI und TurBO lagen bei wenigen Sekunden und CMA-ES und Sobol im Millisekundenbereich. Diese Beobachtung deckt sich mit der Literatur (Eriksson and Jankowiak, 2021).

TurBO nähert sich mit größerem Budget den Werten von SAASBO an. Dies deutet

darauf hin, dass die Leistungsvorteile von SAASBO erst bei sehr aufwändigen Simulationen, mit langen Laufzeiten, zum Tragen kommen. Davor lassen sich vermutlich mit größerem Budget unter Anwendung von TurBO gleichwertige Ergebnisse erzielen.

CMA-ES kann bei geringerer Hardwareausstattung, einem angemessenen Explorationsfaktor und geringen Simulationslaufzeiten ebenfalls eine geeignete Option sein. Bei größeren Budgets weist es eine ähnliche Konvergenz zu TurBO auf und ist dabei ressourcenschonender. Die beträchtliche Varianz der Ergebnisse für CMA-ES kann nur mithilfe zusätzlicher Experimente analysiert werden. So wäre es interessant festzustellen, ob der Algorithmus selbst dafür verantwortlich ist, oder ob dies auf den erwähnten Explorationsfaktor zurückzuführen ist.

4.2 Methodik

Die MRP-Simulation wurde in einer stark vereinfachten Form modelliert. Sie dient im Rahmen dieser Untersuchung als angemessene Problemstellung für hierarchisch verknüpfte Eingabeparameter und weist mit den Stücklisten eine einfache Möglichkeit zur schrittweisen Erweiterung des Parameterraums auf. So konnte das Verhalten der Algorithmen bei unterschiedlicher Dimensionalität untersucht werden. Die Simulationszeiten sind mit wenigen Sekunden gering, verglichen mit in der Praxis üblichen Laufzeiten von bis zu mehreren Minuten oder Stunden. So konnten vielzählige Experimente in der begrenzten Zeit realisiert werden. Dennoch liegt in dieser Studie der Fokus auf der Konvergenz der Algorithmen, die vordergründig bei zeitaufwendigen Simulationen ein wichtiges Gütekriterium darstellt.

Die Auswahl der BO-Algorithmen repräsentiert nur einen kleinen Teil der existierenden Varianten der Bayes'schen Optimierungsverfahren. Die Selektion erfolgte anhand der in der jeweiligen Veröffentlichung genannten Eigenschaften des Algorithmus im Kontext der Problemstellung (hochdimensional, eine Zielgröße, stochastisch). GPEI wurde gewählt, da es als klassische Form der Bayes'schen Optimierung angesehen wird. BO-Algorithmen, die mit Dimensionseinbettung arbeiten, wie REMBO (Wang et al., 2016) oder ALEBO (Letham et al., 2020), wurden nicht ausgewählt. Diese Gruppe wies bereits in einer vorgelagerten Masterarbeit unzureichende Ergebnisse für die gleiche Problemstellung auf. Während des Experimentierzeitraums traten unerwartete Probleme mit dem SAASBO-Algorithmus auf. Zum einen kam es bei Experimenten mit großer BOM (≥ 50) und hohem Budget (>200) zu technischen Fehlern beim Fitting des Modells, die auf die GPU-Arbeitsspeichernutzung des in BoTorch implementierten Algorithmus zurückzuführen sind. Der Fehler konnte in Anbetracht der Zeit nicht behoben werden. Zum anderen wurden die Zeiten des Modellfittings unterschätzt, was die Anzahl der ausführbaren Replikationen reduzierte. Die Daten werden soweit möglich nachgereicht und sind über die weiter unten verlinkte Website einsehbar.

4.3 Weiterer Forschungsbedarf

Der vorliegende Beitrag kann als Auslotung der Möglichkeiten zur sequentiellen Optimierung von MRP-Simulationen betrachtet werden. Die Ergebnisse geben Grund zur Annahme, dass eine Anwendung von BO auf die Problemstellung und deren unterschiedliche Instanzen sinnvoll ist. Daraus ergeben sich weitere, breit gestreute Forschungsbedarfe. Basierend auf den generierten Ergebnissen und der praxisnäheren Mehrzielmodellierung der MRP-Simulation, wie sie auch von anderen Autoren

adressiert wird, ergibt sich für die Autoren eine hohe Priorität von Multi-Objective-SAASBO und Multi-Objective-TurBO. Zu ersterem gibt es einen Ansatz, welcher SAASBO mit der qNEHVI-Acquisition Function (Daulton et al., 2021) erweitert (ax.dev/tutorials/saasbo_nehvi). Dadurch wird es möglich, statt nur eines Punkts eine Pareto-Front der Zielgrößen zu generieren. Zu zweitem wurde ein Algorithmus, MORBO (Daulton et al., 2022), entwickelt. Dieser greift den Trust-Region Ansatz von TurBO auf und erweitert diesen um eine Multi-Objective-Acquisition-Function (HVI). Nachgelagert kann basierend auf diesen Ergebnissen ein Benchmark mit menschlichen Entscheidern erfolgen und theorisiert werden, wie die Entscheider die Methoden praktikabel nutzen können.

Verwendete Hilfsmittel und ergänzendes Material

Bei der Anfertigung dieses Beitrags wurde DeepL (deepl.com) für sprachliche Verbesserungen im englischen Abstract verwendet. Ferner wurde auf ChatGPT (chat.openai.com) zurückgegriffen, um einzelne Passagen des Beitrags sprachlich zu verbessern. Die Visualisierungen und Tabellen wurden mit R und dem Tidyverse unter Verwendung des R-Studio Desktop (r-studio.com) erstellt. Als ergänzendes Material zu diesem Beitrag werden die in den Experimenten erhobenen Daten zusammen mit den Analyseergebnissen über eine GitHub-Website veröffentlicht. Im gleichen Repository befinden sich auch die R-Quelldateien. Der Quellcode für das entwickelte SimBO-Framework ist ebenfalls auf GitHub veröffentlicht:

- Analysen: <https://winf-hsos.github.io/paper-parameter-opt-mrp-bo>
- R-Quellcode: <https://github.com/winf-hsos/paper-parameter-opt-mrp-bo>
- SimBO-Framework: <https://github.com/pehzet/SimBO>

Literatur

- Amaran, S., Sahinidis, N.V., Sharda, B., Bury, S.J., 2016. Simulation optimization: A review of algorithms and applications. *Ann Oper Res* 240, 351–380.
- Balandat, M., Karrer, B., Jiang, D.R., Daulton, S., Letham, B., Wilson, A.G., Bakshy, E., 2020. BoTorch: A Framework for Efficient Monte-Carlo Bayesian Optimization. ePrint arXiv:1910.06403.
- Berkenkamp, F., Krause, A., Schoellig, A.P., 2021. Bayesian Optimization with Safety Constraints: Safe and Automatic Parameter Tuning in Robotics. *Mach Learn* (2021)
- Bull, A.D., 2011. Convergence rates of efficient global optimization algorithms.
- Damand, D., Lahrichi, Y., Barth, M., 2022. A simulation-optimization approach to parameterize Demand-Driven Material Requirements Planning. *IFAC-PapersOnLine*, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022 55, 263–268.
- Daulton, S., Balandat, M., Bakshy, E., 2021. Parallel Bayesian Optimization of Multiple Noisy Objectives with Expected Hypervolume Improvement.
- Daulton, S., Eriksson, D., Balandat, M., Bakshy, E., 2022. Multi-Objective Bayesian Optimization over High-Dimensional Search Spaces.
- Eriksson, D., Jankowiak, M., 2021. High-Dimensional Bayesian Optimization with Sparse Axis-Aligned Subspaces.

- Eriksson, D., Pearce, M., Gardner, J., Turner, R.D., Poloczek, M., 2019. Scalable Global Optimization via Local Bayesian Optimization, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc.
- Frazier, P.I., 2018. A Tutorial on Bayesian Optimization. eprint arXiv:1807.02811
- Gansterer, M., Almeder, C., Hartl, R.F., 2014. Simulation-based optimization methods for setting production planning parameters. *International Journal of Production Economics* 151, 206–213.
- Hansen, N., 2016. The CMA Evolution Strategy: A Tutorial. ePrint arXiv.1604.00772
- Letham, B., Calandra, R., Rai, A., Bakshy, E., 2020. Re-Examining Linear Embeddings for High-Dimensional Bayesian Optimization.
- Nguyen, A.-T., Reiter, S., Rigo, P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy* 113, 1043–1058.
- Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., Antiga, L., Desmaison, A., Köpf, A., Yang, E., DeVito, Z., Raison, M., Tejani, A., Chilamkurthy, S., Steiner, B., Fang, L., Bai, J., Chintala, S., 2019. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library.
- Shahriari, B., Swersky, K., Wang, Z., Adams, R.P., Freitas, N. de, 2016. Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization. *Proceedings of the IEEE* 104, 148–175.
- Sobol', I.M., 1967. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 7, 86–112.
- Stadtler, H., Kilger, C., Meyr, H. (Eds.), 2015. *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Springer Texts in Business and Economics. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wang, Z., Hutter, F., Zoghi, M., Matheson, D., De Freitas, N., 2016. Bayesian Optimization in a Billion Dimensions via Random Embeddings. *jair* 55, 361–387.
- Werth, B., Karder, J., Beham, A., Altendorfer, K., 2023. Simulation-based Optimization of Material Requirements Planning Parameters. *Procedia Computer Science, 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing* 217, 1117–1126.
- Zhang, Y., Apley, D.W., Chen, W., 2020. Bayesian Optimization for Materials Design with Mixed Quantitative and Qualitative Variables. *Scientific Reports* 10, 4924.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Deep Reinforcement Learning for Workload Balance and Due Date Control in Wafer Fabs

Deep Reinforcement Learning für Workload Balance und Fälligkeitskontrolle in Wafer Fabs

Zhugen Zhou, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Munich (Germany), zhugen.zhou@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: Semiconductor wafer fabrication facilities (wafer fabs) often prioritize two operational objectives: work-in-process (WIP) and due date. WIP-oriented and due date-oriented dispatching rules are two commonly used methods to achieve workload balance and on-time delivery, respectively. However, it often requires sophisticated heuristics to achieve both objectives simultaneously. In this paper, we propose a novel approach using deep-Q-network reinforcement learning (DRL) for dispatching in wafer fabs. The DRL approach differs from traditional dispatching methods by using dispatch agents at work-centers to observe state changes in the wafer fabs. The agents train their deep-Q-networks by taking the states as inputs, allowing them to select the most appropriate dispatch action. Additionally, the reward function is integrated with workload and due date information on both local and global levels. Compared to the traditional WIP and due date-oriented rules, as well as heuristics-based rule in literature, the DRL approach is able to produce better global performance with regard to workload balance and on-time delivery.

1 Introduction

In semiconductor wafer fabs, dispatching rules are commonly applied as shop floor control policies to achieve specific objectives, such as workload balance and on-time delivery. Among the WIP-oriented rules, minimum inventory variability scheduling (MIVS) (Li et al. 1997) stands out as a representative method for workload balance. MIVS prioritizes operations with high WIP and downstream operations with low WIP to prevent starvation at the downstream operations. Conversely, it assigns low priority to operations with low WIP and downstream operations with high WIP. MIVS aims to keep the WIP of each operation close to the average target WIP level, which effectively reduces WIP variation and accelerates job movement.

As many wafer fabs change from mass production to mass customization to satisfy customers, due dates become another critical factor. Due date-oriented rules like operational due date (ODD) (Keskinocak and Tauyr 2004) are applied to achieve on-

time delivery. ODD rule breaks up slack time into as many segments as the number of operations of a job, which means it considers due dates for all intermediate operations. The ODD value of operation i is defined as: $ODD = ReleaseTime + RPT(i) * DDF$, where $RPT(i)$ denotes the raw processing time for a sequence of processing steps or operations from operation 1 to operation i (including operation i) and DDF denotes target due date flow factor which is the ratio of target cycle time and raw processing time of a job.

In modern wafer fabs, achieving both WIP and due date targets simultaneously is a major challenge as workload balance and on-time delivery are conflicting objectives (Zhou 2015). WIP-oriented rules often overlook job due dates, while the due date-oriented rules prioritize tardy jobs most possibly at the expense of workload balance. To address this challenge, a heuristic-based composite rule (Zhou and Rose 2011) that combines three single rules, i.e., least work at next queue rule (LWNQ, the job with the least workload at the downstream queue is preferred), ODD rule and shortest processing time rule (SPT, the job with the shortest processing time is preferred), is developed in a previous study. A design of experiment is used to calculate the scaling parameters which determine the contribution of each single rule. The composite rule outperforms the three single rules in terms of cycle time and tardiness performance. However, its disadvantage is that the performance depends heavily on user-defined scaling parameters, making it computationally expensive to achieve globally optimal performance. Therefore, self-learning methods such as machine learning offer promising approaches for dispatch decision-making in achieving workload balance and on-time delivery.

Deep reinforcement learning (DRL) has attracted more and more attention for decision-making problems in recent years (Panzer et al. 2021). Riedmiller and Riedmiller (1999) proposed a RL approach in which agents deal with specified features of the factory to optimize global sum tardiness. Similarly, Waschneck et al. (2018) applied Google DeepMind's deep-Q-network agent algorithm at an abstract frontend-of-line semiconductor production facility taking due date as global optimization objective. Sakr et al. (2021) proposed an application of DRL for dispatching and resource allocation in a real semiconductor manufacturing system. Both of the input states and reward function consist of local and global information of the wafer fabs. Different from the literature, our study aims to find out if the DRL is able to solve the problem of conflicting objective, i.e., workload balance and on-time delivery, for wafer fabs. In this paper, an independent dispatch agent is defined to achieve self-learning for dispatch decision. Firstly, the agent is responsible for observing the state changes of wafer fabs. Then it learns to take action for dispatch decision by employing the deep-Q-network reinforcement learning. After that it receives rewards, which are the key performance indicators (KPIs) in wafer fabs, to correct its action. The agent continuously learns and improves its decision-making abilities in order to select the most optimal dispatch decision.

2 Simulation Environment and Deep Reinforcement Learning

2.1 Problem Statement

Semiconductor wafer fabs are considered as one of the most complex manufacturing systems because of its production variations such as mix products, re-entrant flow, hundreds of work-centers, machine breakdown, setup and batch processing. To achieve expected objectives, dispatching rules are commonly used as a way of shop floor control. WIP-oriented rules reduce variability by controlling the flow of jobs, which is able to speed up job movement and reduce cycle time. However, it often balances workload at the expense of the pace of job movement, for example, some jobs finish ahead of schedule, while others become tardy. On the contrary, due date-oriented rules focus on the job movement with right pace toward due date, which often results in high WIP level and cycle time. When both low WIP level and good on-time delivery performance are desired simultaneously, it can be challenging to achieve both objectives using either a WIP-oriented rule or a due date-oriented rule alone.

2.2 Deep Reinforcement Learning

Deep reinforcement learning is a type of machine learning algorithm that involves training an artificial neural network to learn how to make decision in a dynamic environment (Panzer et al. 2021). Agents interact with the environment by taking actions with action-selection policy $\pi_t(a|s)$, and receive feedback in the form of reward which is expressed as action-value function $Q_\pi(s|a)$. The Q-function is the accumulated discount future reward when policy π is utilized. The optimal Q-function $Q^*(s|a)$ is defined as the maximum reward that can be obtained by applying the optimal policy (Equation (1)), where s is the state, a is the action, t is the time-step, γ is the discount factor with a value in $[0,1]$, π is the action-selection policy. The agent applies artificial neural network called deep-Q-network as the Q-function approximation to predict the expected reward. Through iteratively training the deep-Q-network is able to approximate the optimal Q-function Q^* .

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} \mathbb{E} \left[\sum_t r_t \cdot \gamma^t \mid s_t = s, a_t = a, \pi \right] \quad (1)$$

2.3 Simulation Environment

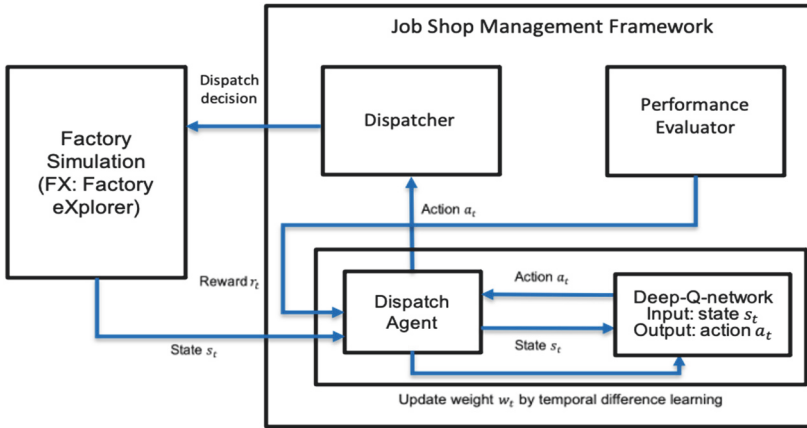


Figure 1: Simulation environment containing deep reinforcement learning

Figure 1 illustrates the simulation environment used in this study. The simulation software is Factory eXplorer (FX) which is a commercial simulation software for factories. A job shop management framework that addresses issues of workload balance and due date control (Zhou and Rose 2015) is developed. The framework comprises two components which are dispatcher and performance evaluator. The dispatcher implements various operational control strategies and calculates the job priority when a dispatch decision is required. The performance evaluator calculates KPIs to assess the performance of each strategy. To integrate the concept of DRL, a dispatch agent is introduced in this study. The agent mainly interacts with the factory simulation by observing state changes and receiving rewards. Upon detecting an available machine, the agent determines the next action (i.e., job selection) using its own deep-Q-network. Based on the factory states, the deep-Q-network predicts the optimal dispatch decision, and the agent executes it to receive rewards that are the KPIs from the performance evaluator. The agent trains the network via temporal difference learning using the differences between current and historical rewards, with the objective to predict better action over time. Table 1 presents the deep-Q-network configuration details.

Table 1: An overview of the deep-Q-network

Input state s_t (see Section 2.4)	Each work-center has two states Each job in the queue has three states
Output action a_t	Each output neuron represents the Q value of the job
Reward r_t (see Section 2.5)	Reward function consists of four parts
Topology	Input layer -> 2 Hidden layers (128 and 64 neurons) -> Output layer
Learning method	Temporal difference learning
Activation function	Rectified linear unit
Learning rate	0.01
Discounted rate	0.8

2.4 System States

The agent needs to learn to make decisions based on the changing states of the system which is the wafer fabs in this case. System states are important as they provide key information for the agent to learn accurately and take proper action. The deep-Q-network facilitates the transformation between system states and action. The system states are considered as inputs and fed into the deep-Q-network. In this study, the system states are defined based on the workload and due date, as they are the major concerns. They consist of work-center states and the states of jobs in the queue.

- Work-center states:
 - Number of its machines considering machine breakdown
 - Number of machines at its downstream work-centers (one-step-ahead) considering machine breakdown
- Job states:
 - Operation due date
 - Final due date
 - Workload indicator of its downstream work-centers (one-step-ahead) (Zhou and Rose 2019)

The work-center states are determined by the availability of machines at current work-center and its one-step-ahead downstream work-centers. The agent must learn to assess whether these work-centers have sufficient capacity to process jobs in the event of machine breakdowns. For example, if a downstream work-center is already overloaded and loses capacity due to a breakdown, the agent should not assign more jobs to it.

When considering job states, the agent takes into account both the operation due date and the final due date. The operation due date serves as a small milestone for the agent to learn whether jobs are progressing at the correct pace through the wafer fabs. The final due date represents the deadline milestone for completing a job to avoid being tardy. In addition to due dates, the agent also assesses the workload indicator, which is defined as the sum of production hours, including load/unload time and raw

processing time of the operation, at the current work-center and its one-step-ahead downstream work-centers. Based on this information, the agent can learn to choose jobs that are appropriate for the workload at downstream processes.

2.5 Reward Function

The reward function determines the reward or penalty that the agent receives based on its actions in the environment. Therefore, the reward function is designed to encourage the agent to take actions that lead to positive outcomes and avoid actions that lead to negative outcomes. The reward function is similar to the system state in that it incorporates feedback from both work-centers and jobs at both local and global levels, as shown in Equation (2).

$$Reward_{i,t} = WD_{j,one-step-ahead_j} + QT_{i,t} + ODD_{i,t} + Tar_{product_{i,t}} \quad (2)$$

Assuming the agent selects job i for processing at work-center j at time t , the corresponding reward function consists of four parts. The value of each part is normalized to ensure each part contributes equally to the overall reward function.

- $WD_{j,one-step-ahead_j}$: is the sum of workload deviations of current work-center j and its one-step-ahead downstream work-center. Workload deviation is the difference between target workload and actual workload.
- $QT_{i,t}$: is the queue time of the job i , which is the time difference between current time t and job arrival time.
- $ODD_{i,t}$: is the difference between current time t and the operation due date for job i .
- $Tar_{product_{i,t}}$: is the sum of tardiness of the jobs belonging to the same product type as job i in the whole wafer fabs. Tardiness is the deviation between current time t and final due date.

The first part, which is the sum of workload deviation of the current and downstream work-center, provides feedback on whether the actual workload is high or low compared to the target workload. As previously described, the agent considers the dynamic workload situation when learning the system. Therefore, the workload deviation tells the agent if selecting a job will have positive or negative effect on the workload situation, i.e., if it will result in an overloaded or underloaded work-center. The value of workload deviation can be positive or negative. From the viewpoint of workload balance, the agent should select a job to avoid congestion in downstream work-center, and consequently, the agent obtains a high value of workload deviation.

The queue time of the job is the second part of the reward. A high WIP level often occurs at a high-utilized work-center as jobs spend considerable time in the queue. In this case, queue time is a useful indicator that tells the agent to prioritize jobs with long queue time to reduce the WIP level. Additionally, this can potentially reduce the cycle time of the job.

The third part of the reward function is the deviation from the operation due date, which indicates whether the selected job will be delayed or not. The higher deviation value implies that the job is deviating more from its operation due date, and selecting such a job may have a cascading effect on subsequent operations. Therefore, the agent should choose jobs that minimize this deviation to avoid potential delays. Compared to the final due date, the operation due date is a more precise indicator for preventing

tardiness as it allows the agent to track the progress of each operation and take corrective actions in timely manner.

When a job is already tardy for its final due date, the last part of the reward function - accumulated tardiness of the product type becomes an important factor. Unlike the operation due date deviation, the accumulated tardiness is always positive and only considers jobs that are already late for their final due date. Thus, when more and more jobs of a product type become tardy, the agent is encouraged to prioritize processing jobs of that type to reduce the overall tardiness.

3 Simulation Model, Experiment and Results

3.1 Simulation Model

The whole wafer fabs dataset MIMAC6 from Measurement and Improvement of Manufacturing Capacities (MIMAC) is used for this study. The interested readers are referred to Fowler and Robinson (1995). The MIMAC6 is a typical complex wafer fabs model including:

- 9 products, 9 process flows, maximum 355 process steps.
- 24 wafers in a lot (job). 2777 lots are released per year under fab loading of 100%.
- 104 tool groups (work-centers), 228 tools (machines). 46 single processing tool groups, 58 batching processing tool groups.
- Sequence dependent setup, rework, MTTR (mean time to repair), and MTBF (mean time between failures) of tool group.

3.2 Simulation Experiment and Results

The concept of dispatch agent and deep-Q-network has been implemented in C++ and integrated into FX simulation software. Each work-center in the MIMAC6 model, which contains 104 work-centers, is theoretically controlled by a dispatch agent. Work-centers with high utilization rate are often overloaded, resulting in significant job queue time. To account for computational complexity, a preliminary study is conducted, and the deep reinforcement learning approach is applied to only the top 5 highest-utilized work-centers and their 27 upstream work-centers. As a result, a total of 32 work-centers are controlled by dispatch agents, each with its own deep-Q-network, while the remaining 72 work-centers are controlled by the FIFO rule. During the training phase, the MIMAC6 model is simulated for 104 weeks, while another simulation of 78 weeks is carried out during the deployment phase. The first 26 weeks are considered as warm-up periods and excluded from statistical analysis. The fab loading is set at 95%, and the target due date flow factor for operation due date and final due date is set at 2.2.

Figure 2 displays the evolution of WIP over 52 weeks. The curve for the FIFO rule shows the most fluctuation, while the ODD rule generates a smoother curve with less fluctuation. The MIVS and the composite rule are able to accelerate the movement of jobs, resulting in lower WIP curves that outperform the FIFO and ODD rules. Similarly, the DRL approach also produces a lower WIP curve as it balances WIP as part of its target. Moreover, starting from the 37th weeks onwards, the DRL approach significantly reduces the WIP level compared to the MIVS and composite rules.

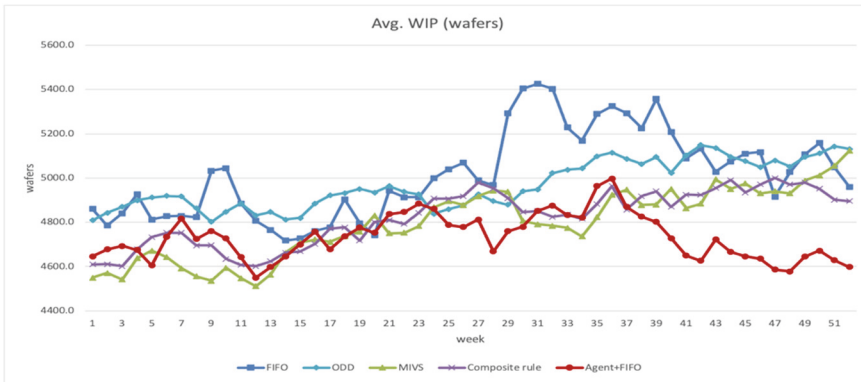


Figure 2: WIP curve comparison

Table 2 presents the performance of the whole wafer fabs, including the average cycle time, cycle time variance, cycle time upper percentile 95%, percent tardy job and average tardiness of tardy jobs. The DRL approach achieves the best performance in terms of average cycle time but not cycle time variance. It balances WIP to accelerate job movement while employing due date information to move jobs at a relatively smooth pace. As a result, 95% of job cycle times are lower than 35.7 days, which leads to the best tardiness performance compared to other four rules.

Table 2: Performance measurements comparison

Scenario	Avg. Cycle Time (days)	Cycle Time Variance (days ²)	Cycle Time Upper Percentile 95% (days)	Percent Tardy Job (%)	Avg. Tardiness for Tardy jobs (days)
FIFO	29.6	1.7	39.1	71.4	2.2
ODD	29.5	0.3	35.8	72.5	1.5
MIVS	28.5	1.3	37.2	56.3	1.7
Composite rule	28.3	1.0	36.3	53.2	0.9
DRL (Agent + FIFO)	27.2	0.8	35.7	40.6	0.7

4 Conclusion

This paper presented a dispatching study based on deep-Q-network reinforcement learning with the aim of achieving workload balance and on-time delivery simultaneously for wafer fabs. The dispatch agent with deep-Q-network is incorporated into FX simulation software. The simulation provides a training environment where the agent acquires knowledge and makes dispatch decisions.

When a machine becomes available, the agent takes the system states, such as the workload of the work-center and due date of the job, as input to train its own deep-Q-network. Then, the agent selects an action based on the output of the deep-Q-network. Finally, the agent obtains reward from the environment to improve its decision-making for future actions.

In contrast to earlier contributions, workload balance and on-time delivery are taken into consideration as objectives. Therefore, the system states are defined carefully to represent the status of the wafer fabs. In addition, in order to encourage the agent to select appropriate actions, the reward function is also properly formulated via the information of workload and tardiness. The simulation results indicate the DRL approach outperforms the FIFO, ODD, MIVS and composite rule in terms of the global performance of average cycle time and average tardiness. This indicates that the DRL approach is capable of achieving workload balance and on-time delivery simultaneously. For future work, we believe there is scope for further improvement when all work-centers are controlled by the agents learning decision via deep-Q-network.

References

- Fowler, J.W.; Robinson, J.: Measurement and improvement of manufacturing capacities(MIMAC): final report. Technical Report 95062861A-TR, Sematech, Austin, 1995.
- Keskinocak, P.; Tayur, S.: Due date management policies. In: Simchi-Levi D., Shen ZJ. (eds) Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis. International Series in Operations Research & Management Science. Springer, Boston, MA, 2004, pp. 485-554.
- Li, S.; Tang, T.; Collins, DW.: Minimum inventory variability schedule with application in semiconductor fabrication. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, February 1996, pp.145-149.
- Panzer, M.; Bender, B.; Gronau, N.: Deep reinforcement learning in production planning and control: a systematic literature review. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Eds.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2021. Hannover: publish-Ing., 2021, pp.535-545.
- Riedmiller, S.; Riedmiller, M.: A neural reinforcement learning approach to learn local dispatching policies in production scheduling. International Joint Conference on Artificial Intelligence 1999, pp.764-769.
- Sakr, A.H.; Aboelhassan, A.; Yacout, S.; Bassetto, S.; Simulation and deep reinforcement learning for adaptive dispatching in semiconductor manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing 34 (2021), pp. 1311-1324.
- Waschneck, B.; Reichstaller, A.; Belzner, L.; Altenmüller, T.; Bauernhansl, T.; Knapp, A.; Kyek, A.; Deep reinforcement learning for semiconductor production scheduling. 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC) 2018, pp.301-306.
- Zhou, Z.; Rose, O.: A composite rule combining due date control and wip balance in a wafer fab. In: S. Jain, R.R.Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, and M. Fu (Eds.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix (USA), December 11th-14th December 2011, pp.2085-2092.

- Zhou, Z.: WIP balance and due date control for complex job shops (wafer fabs). Ph.D. thesis, Department of Computer Science, die Universität der Bundeswehr München, Germany. <http://athene-forschung.rz.unibw-muenchen.de/node?id=97064>, accessed March 17, 2015.
- Zhou, Z.; Rose, O.: A framework for effective shop floor control in wafer fabs. In: L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal, and M. D. Rossett (Eds.): Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC), Huntington Beach (USA), December 6th-9th December 2015, pp.3001-3012.
- Zhou, Z.; Rose, O.: A global wip oriented dispatching scheme: work-center workload balance without relying on target wip. In: N. Mustafee, K.-H.G. Bae, S. Lazarova-Molnar, M. Rabe, C. Szabo, P. Haas, and Y.-J. Son (Eds.): Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference (WSC), National Harbor (USA), December 8th-11th December 2019, pp.2212-2223.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

On the Usage of Container and Container Orchestrators as a Computational Infrastructure for Simulation Experiments

Containerisierung und Container Orchestrierung als high-performance Infrastruktur für Simulationsexperimente

Daniel Seufferth, Heiderose Stein, Falk Stefan Pappert, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany) daniel.seufferth@unibw.de, heiderose.stein@unibw.de, falk.pappert@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: The execution of simulation experiments becomes increasingly resource-intensive, either due to the increasing scale and complexity of the simulation model or the nature of the experiment itself. Popular approaches, like simulation-based optimisation and data farming, require extensive computational resources. Therefore, an appropriate methodology is needed to distribute simulation workloads onto complex computing infrastructures efficiently. Containerisation and container orchestration are promising approaches toward this goal. This paper discusses the requirements needed to utilise containerisation for simulation, gives an example of a container-based computational infrastructure for experimentation, and shows how containerisation and container orchestration benefit simulation execution.

1 Introduction

Computational power is a limiting factor for simulation. Over the past decades, the increasing performance of personal computer hardware allowed focusing the execution of simulation experiments on the use of single PCs. When the complexity of one single simulation run – or the sheer number of simulation experiments as in data farming or simulation optimisation (Lechler et al. 2021) – exceeds the capacity of a single PC (see Sanchez et al. 2021), there is a need to use more powerful computing systems (Król et al. 2013) as an environment for running simulations.

Evaluation of how simulation experiments can be sped up using high-performance computing infrastructures began in the 1970s (Taylor 2019). The ongoing trend of cloud computing and virtualisation techniques offers an interesting opportunity to revisit this topic: containerisation can encapsulate the simulation and makes it independent of the cluster technology. And by using container orchestration tools, scalability becomes readily available for simulation experimentation.

The research on high-performance computing infrastructures is diverse and growing. For example, Scalarm and DIRAC present different computing infrastructures to distribute simulation workloads onto multiple computing nodes in heterogeneous environments (Król et al. 2013). Anagnostou et al. 2019 evaluated recent technological approaches with their work on simulation experimentation frameworks, applying a micro-services auto-scaling approach utilising MiCADO. MiCADO focuses on efficiently utilising cloud resources, dynamically scaling the Kubernetes cluster it uses for container orchestration. It also extends the manifest files for Kubernetes Application Programming Interface (API) objects with its Application Description Templates (MiCADO Project 2023). This makes MiCADO less universal and adds the risk of delayed implementation to changes in Kubernetes API objects and extensions of upstream Kubernetes. Reviewing the recent literature, to the authors' knowledge, no solution is readily available to containerise a given simulation tool and run it on a cluster.

We currently do not see a significant uptick in adopting these methods within the simulation community, neither on the side of the practitioner nor the side of software vendors. We generally observe a need for more awareness in our community, which we would like to address by first discussing the requirements to use these technologies for simulation purposes. Additionally, we show a straightforward approach to building a container-based computer cluster as a framework for running simulation experiments to make this technology more accessible.

The remainder of this article is structured as follows: First, we discuss some requirements and prerequisites for containerisation and container orchestration of simulation workloads. This is followed by describing how we set up the simulation cluster at the University of the Bundeswehr Munich. To illustrate the capabilities of different computing infrastructures, we give an overview of experimentation results and how Kubernetes benefits the user in addressing more computational resources for simulation workloads. Lastly, as an outlook, we propose possible next steps and research opportunities.

2 Requirements to use containerisation for simulation

Using containers for simulation execution comes with different requirements for the simulation engines. We group these into three categories, which will be discussed in the following subsections:

- Modelling requirements
 - Automated model generation
- Integration
 - External trigger
 - Headless simulation
- Usability in container environments
 - Operating system
 - Ephemeral simulation models
 - Licensing
 - Containerization

2.1 Modelling requirements

Modelling requirements describe how well models can be exchanged with a simulation package. The simulation package needs to support the creation of models by external systems. Especially with running simulation experiments on a larger scale, where it is more feasible to generate new models instead of parameterising a hand-made model, the ability to automatically generate models for a given simulator becomes increasingly important. Simulation packages allow automated ways of model building to different degrees. Higher levels mean more of the generator is independent of the simulation package, allowing for more flexibility and possible reuse for other packages. Several levels of automation can be considered:

1. No automation
2. Parameterization of a hand-made model
3. Bootstrapping models based on external data
4. External generation of model files
5. Online model generation using an API

Although automated model generation is not a new topic, its increasing relevance in the face of online simulation and digital twins has yet to lead vendors to support higher-level automation approaches. Therefore, careful consideration of automated model generation capabilities should be given when scaling up model execution.

2.2 Integration

Integration requirements describe how well a simulation package can be integrated into another software system, e.g., how well it can be started and executed. For execution, generally, containerised software in Kubernetes is running headless. Graphical User Interfaces (GUIs) allowing access to the backend software may be run as independent web services if needed. This fundamental aspect of containers affects the usage of containerisation technology for simulation execution.

Besides running headless, how a simulation run can be triggered is a big concern. In most simulation environments, the user starts a simulation run by clicking a button on the GUI. Automating simulation runs, this is no longer a feasible solution. Although most simulation packages bring their simulation execution environment, these are typically not yet designed to support simulations on distributed infrastructures. Building such systems requires developing an experiment manager and an external way to trigger a simulation run. The most common way this is supported is by using command-line interfaces. A more convenient option could be starting simulations utilising an API.

2.3 Usability in container environments

2.3.1 Operating system

Containerisation is a form of operating system virtualisation. (Huawei Technologies Co. Ltd. 2023) summarises the evolution of containerisation, beginning with the chroot-command and finishing with modern containerisation formats like Docker or LXC. As containers use the kernel of the host operating system (OS), Linux-based containers can only run on hosts with Linux. This, in turn, means that the simulation model to be containerised must run on Linux, restricting the number of simulation engines that can be used for model creation as only some engines support Linux.

Simulation engines requiring Windows can only be run as a Windows container. This means that a hybrid cluster, consisting of both Linux and Windows worker nodes, is necessary, as the control plane of Kubernetes must run on Linux (Kubernetes 2023). A hybrid configuration of Kubernetes generates a performance loss, as it is no longer possible to allocate all the available resources when nodes of several operating systems need to be provided. This mix of systems increases the complexity of resource allocation.

Table 1: List of simulation tools and the support of Linux-based OSs

Simulation tool	Linux support?
ANSYS	Yes
Anylogic	Yes
Factory Explorer	No (Windows only)
Flexsim	No (Windows only)
Matlab/Simulink	Yes
OpenModelica	Yes
Simio	No (Windows only)

Table 1 gives an overview of different simulation tools we have used for various purposes (discrete event simulation, fluid simulation, etc.) and whether they support Linux. This small overview shows that although Linux support is not an exception, even popular simulation tools require Windows.

2.3.2 Ephemeral simulation models

As a container orchestrator, Kubernetes aims to have all containers running. If containers fail, it automatically restarts them as new instances, possibly on a different worker node. This characteristic of containers is called ephemeral, meaning they can get killed and restarted at any given time due to internal or external causes, e.g., software updates, load balancing, or simulation failures. Therefore, simulation models that run as containers in Kubernetes should support this ephemeral nature. Here are a few ideas on how to handle simulation in such an environment:

- One of the easiest ways of handling the ephemeral nature of containers inside Kubernetes is accepting the killing of execution runs and restarting it. This comes with the question of monitoring lost simulation runs. Kubernetes has several extensions that provide extensible monitoring and logging features, which can be used to keep track of prematurely stopped scenario calculations.
- Keeping track and storing the progress of simulation runs. Therefore, killed instances of the model can be restarted without losses using cached data. To keep an up-to-date image of the current simulation state in storage, continuous updates to this image are required, which causes a significant amount of data to be transferred and stored. Besides the general cost of storing, there will likely be an adverse effect on simulation speed due to these tasks. Therefore, this approach is only feasible in an environment where successfully finishing simulation runs is otherwise unlikely due to very long simulation runs or unstable computing hardware.

- Starting additional instances, adding redundancy, and decreasing the risk of data loss in case of a container failure. As most simulations already utilise replications to achieve sufficient confidence intervals, adding additional runs depending on stability would not increase the load by a large margin.

Using containerisation technologies for simulating models at scale brings with it the need to consider the premature termination of simulation containers. This affects the number of simulation runs that can be completed. Furthermore, it requires consideration of the data collected during one run. While simulation models that purely run in memory usually leave no trace when their surrounding container disappears, simulation models reporting data during the simulation run to a database require more involved handling as incomplete data needs to be cleaned in case the container fails.

2.3.3 *Licensing problems*

The software vendor's approach to licensing is also a topic worth considering when deciding on a simulation package. When considering licensing, the cost structure should be reviewed. There are simulation packages where costs depend only on the model development environment. This allows very flexible scaling of the simulation to new or different projects. Then there are per-user/seat licenses, which can be challenging to scale in a legally safe way. A third option is a licensing model, which charges per core, which can get expensive when sufficient hardware is available.

Another side to licensing, besides the cost and legality, is the way the developer enforces licensing. From our point of view, licensing servers with concurrent licensing are ideal for a dynamic environment like Kubernetes. Any licensing scheme enforced by hardware restrictions significantly limits its use in a container environment. Examples are license codes tailored to a specific PC or hardware keys provided as USB dongles.

2.3.4 *Containerization*

Creating container images depends on the choice of the container engine. Multiple engines like Docker (Docker Inc. 2023), Podman (Podman 2023) or Apptainer (Apptainer Project 2023) are available, all of which have a similar approach to image creation, utilising a descriptive file that defines all steps necessary for containerisation, which we will call the "containerisation file" in the following.

The containerisation file generally begins with a base image, e.g., an Alpine Linux image, and defines which libraries and binaries to add. In the case of a simulation model, you need to package your simulation tool of choice so the simulation engine is available inside the container. Supporting installation via the command line, containerisation of the chosen simulation tools is done by adding a single command to the containerisation file. If this simple installation method via the command line is not supported, a more tedious approach must be utilised for installing the simulation tool.

A wholly optimised containerisation process for simulation models means that simulation package developers provide usable images of their simulation software, streamlining the containerisation process of simulation models.

In a perfect world, simulation software developers would provide a base image of their simulation package, where the user only needs to add their model.

3 Our current setup

Creating our simulation cluster based on Kubernetes has been an iterative process, starting with small test configurations and moving to clusters sufficient for large-scale parallelised simulation experiments. This section describes the setup of the simulation cluster we currently use at the University of the Bundeswehr Munich.

The cluster runs on a server that consists of 40 hosts. Instead of running Kubernetes on bare-metal – meaning that the cluster has access to the OS of the hosts – a virtualisation layer is between the physical hardware and the Kubernetes cluster. The usage of virtualisation has two benefits:

1. Added flexibility: instead of purely running Kubernetes on the cluster, virtualisation enables us to run independent virtual machines for particular use cases, e.g., different guest operating systems.
2. Added security: the virtualisation layer isolates the host kernel from the kernels of the guests used by Kubernetes.

Rancher – a cluster management tool – is used to configure the cluster. Rancher itself runs as a container inside of a smaller Kubernetes cluster. Rancher's WebUI allows the configuration of the virtual machines that run Kubernetes, automatically creates the virtual machines, and sets up the Kubernetes cluster. Rancher uses a particular distribution of Kubernetes called RKE2 (Rancher Kubernetes Engine 2), which is more lightweight than upstream Kubernetes and focuses on security (Rancher Labs 2023). It also comes with “containerd” (containerd 2023) as the embedded container runtime and supports hybrid cluster configurations consisting of both Linux and Windows worker nodes. Rancher not only automates the cluster creation process but also simplifies the installation of additional software, e.g., monitoring software or storage provisioning, through integrated software repositories and automated installation utilising Helm charts.

In line with best practices, the current simulation cluster of the University of the Bundeswehr Munich consists of multiple control planes and worker nodes. Each of them is running on Ubuntu. The control plane is composed of three nodes, ensuring high availability, that do not run simulation workloads, therefore needing far fewer resources. Six cores and six gigabytes of Random-access Memory (RAM) are sufficient for the workloads the control plane nodes have to execute. We currently use a basic set of four worker nodes, which provide the infrastructure to compute simulation workloads. The virtual machines are configured to consume almost all host resources, using 60 of the 64 cores available and one terabyte of RAM. This provides a computational power of 240 cores and four terabytes of RAM for this cluster. This represents about 10 % of the resources available. If more computing power is required, Rancher allows us to quickly scale the cluster up, adding worker nodes and increasing the cluster's computational resources. Figure 1 visualises the simulation cluster in detail.

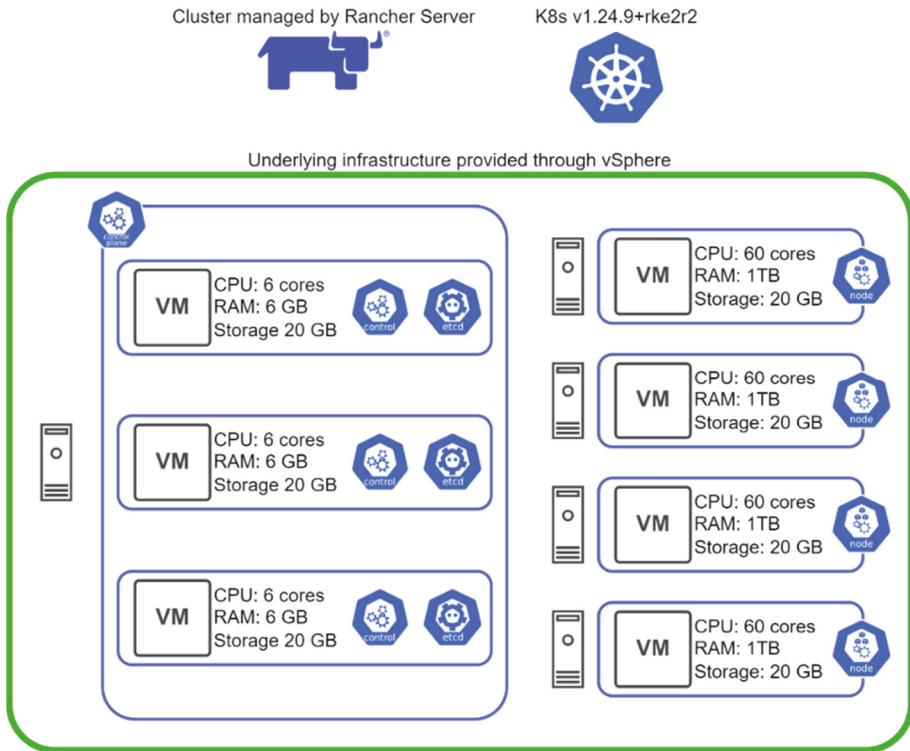


Figure 1: Setup of the current simulation cluster

4 Performance testing

The first test case run on our simulation cluster is based on our work on utilisation thresholds for equipment groups described in (Pappert et al. 2017). The simulation engine used in this project is an in-house development in Java, with the model being created by simply calling methods of the meta-model. With Java being platform-independent, containerisation was a simple process, only needing a base container image that provides the Java Runtime Environment. Furthermore, the experiment engine was designed with distributed execution in mind, meeting many of the requirements for utilising containerisation mentioned above.

With our historical changes to the computational infrastructure used, we can retrace the performance gain achieved by utilising different setups, finally leading to containerisation and Kubernetes. Figure 2 visualises the performance – measured by the number of scenarios evaluated per day – based on other computational infrastructures. The shown infrastructures use different underlying hardware; therefore, the depicted performance gain can primarily be attributed to the extension of the hardware resources. The last two entries show our current simulation server in two different levels of scaling. The primary benefit we see in using Kubernetes comes with its ease of scaling. Once a small cluster is set up on a small portion of hardware, scaling available processing power to full capacity is but a matter of a few minutes.

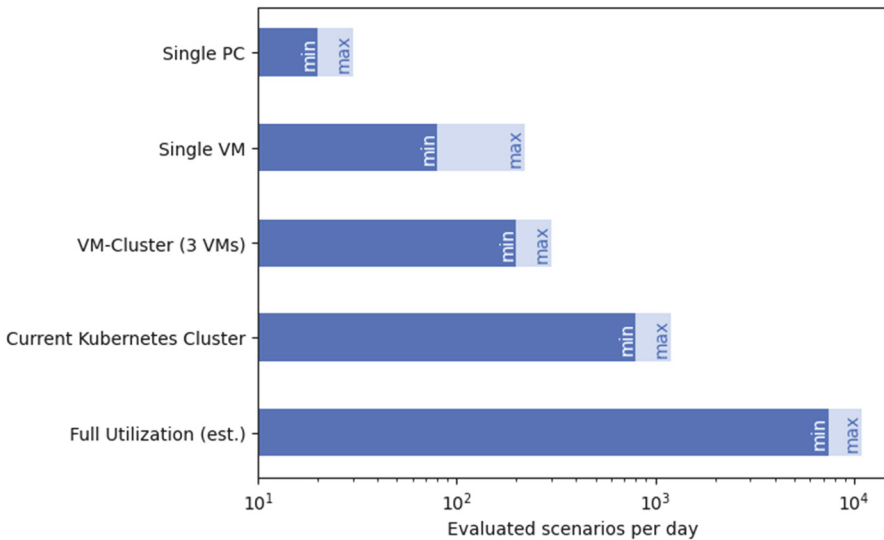


Figure 2: Performance comparison based on different computational infrastructures shows the number of scenarios calculated daily for each setup

5 Summary and further research

We have shown an example setup using Rancher and Kubernetes to facilitate the creation of large-scale computational infrastructure. It is built solely with free and open-source software so that it can be used as a template for other Kubernetes clusters. As the software used supports several kinds of infrastructures – different cloud providers and on-premises infrastructure – it is flexible and can be used in environments that differ from the one discussed here. The resulting cluster simplifies the allocation of computing resources, making more extensive computing infrastructures accessible to the user.

We have discussed different requirements regarding utilising containerisation for simulation workloads on distributed infrastructures. Several of these points should be further researched to streamline the containerisation process of simulation models and increase the acceptance of containerisation in the simulation community.

Acknowledgements

We want to thank Uwe Langer and Alexandros Karagkasidis for their continuous hardware infrastructure support.

This research is funded by dtec.bw – Center of Digitalization and Technology Research of the Bundeswehr.

dtec.bw is funded by the European Union – NextGenerationEU.

References

- Anagnostou, A.; Taylor, S.J.; Abubakar, N.T.; Kiss, T.; DesLauriers, J.; Gesmier, G.; Terstyanszky, G.; Kacsuk, P.; Kovacs, J.: Towards a deadline-based simulation experimentation framework using micro-services auto-scaling approach. In: Mustafee, N.; Bae, K.-H.G.; Lazarova-Molnar, S.; Rabe, M.; Szabo, C.; Haas, P. and Son, Y.-J. (Eds.): Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference (WSC), National Harbor (USA), December 8th-11th December 2019, pp. 2749–2758.
- Apptainer Project, 2023: Documentation | Apptainer. <https://apptainer.org/docs/>, accessed May 11th, 2023..
- containerd, 2023: containerd overview. <https://containerd.io/docs/>, accessed May 12th, 2023.
- Docker Inc., 2023: Docker Engine overview. <https://docs.docker.com/engine/>, accessed May 11th, 2023.
- Huawei Technologies Co., Ltd.: Container technology. In: Cloud computing technology: Springer, Singapore 2023, pp. 295–342.
- Król, D.; Wrzeszcz, M.; Kryza, B.; Dutka, Ł.; Kitowski, J.: Massively scalable platform for data farming supporting heterogeneous infrastructure. In: Zimmermann, W. (Eds.): The 4th International Conference on Cloud Computing, Grids, and Virtualization, Valencia (Spain), May 27th-1st June, pp. 144–149.
- Kubernetes, 2023: Windows containers in Kubernetes. <https://kubernetes.io/docs/concepts/windows/intro/>, accessed March 28th, 2023.
- Lechler, T.; Sjarov, M.; Franke, J.: Data Farming in Production Systems - A Review on Potentials, Challenges and Exemplary Applications. *Procedia CIRP* 96 (2021), pp. 230–235.
- MiCADO Project, 2023: Application Description Template - MiCADO. <https://micado-scale.github.io/adt/>, accessed April 13th, 2023.
- Pappert, F.S.; Rose, O.; Suhrke, F.; Mager, J.: Simulation based approach to calculate utilization limits in opto semiconductor frontends. In: Chan, V.W.K.; D’Ambrogio, A; Zacharewicz, G; Mustafee, N.; Wainer, G. and Page, E.H. (Eds.): Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas (USA), December 3rd-6th December 2017, pp. 3888–3898.
- Podman, 2023: Getting Started with Podman | Podman. <https://podman.io/docs>, accessed May 11th, 2023.
- Rancher Labs, 2023: Introduction | RKE 2. <https://docs.rke2.io/>, accessed May 5th, 2023.
- Sanchez, S.M.; Sanchez, P.J.; Wan, H.: Work smarter, not harder: A tutorial on designing and conducting simulation experiments. In: Kim, S.; Feng, B.; Smith, K.; Masoud, S.; Zheng, Z.; Szabo, C. and Loper, M. (Eds.): Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix (USA), December 13th-17th December 2021, without page numbers.
- Taylor, S.J.: Distributed simulation: state-of-the-art and potential for operational research. *European Journal of Operational Research* 273 (2019) 1, pp. 1–19.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Automated Generation and Simulation of Hyper Heuristics for Stochastic Multi-Mode Multi-Project Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Setup Times

Automatisierte Generierung und Simulation von Hyper-Heuristiken für stochastische Multi-Modus-Multi-Projekt-ressourcenbeschränkte Projekt- und Systemplanungsprobleme mit Umrüstzeiten

Rico Zöllner, Mathias Kühn, Konrad Handrich, Thorsten Schmidt, TU Dresden, Dresden (Germany), rico.zoellner@tu-dresden.de, mathias.kuehn@tu-dresden.de, konrad.handrich@tu-dresden.de, thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Abstract: A simulation framework is presented which covers both generation and simulation of production planning and control problems which include transfer times and stochastic influences and therefore extend classical multi-mode multi-project RCPSPs. This allows for systematic and in-depth investigations of the quality and the behaviour of heuristics. In addition, the automated design of heuristics based on Boolean operators applied to relations of problem specific quantities leads on average to better results than a manual selection and adjustment of heuristic strategies.

1 Introduction

With the advent of Industry 4.0 and the continuous establishment of the associated innovative tools and techniques within the realm of AI, ML algorithms and human-machine-interaction, technical possibilities to increase productivity and efficiency previously lain beyond the horizon are opening up in daily production routines. At the same time, the targeted and effective application of the new techniques poses – due to their complexity and diversity – challenges for users in practice on the one hand and academic researchers on the other hand. Both tendencies show up impressively in the field of production planning and control (PPC). Recent developments in production tend towards shorter product life cycles, smaller batch sizes and distinct individual customer requirements, which entails widely spread product ranges. In addition, interdependencies and the influence of imprecise or missing process parameters and the relevance of the disturbance variables are increasing. To deal with the above tasks, hyper heuristics emerged as a promising option because finding the global optimum with justifiable efforts for PPC problems remains illusory even with improved

computational power due to the size and the NP-hardness of such problems (see (Artigues et al., 2013; Snauwaert and Vanhoucke, 2023; Hartmann and Briskorn, 2022) for surveys on resource-constrained project scheduling problems (PSP) and (Đurasević and Jakobović, 2023; Guo et al., 2022; Zhang et al., 2021; Branke et al., 2016; Burke et al., 2013; Luo et al., 2022) for surveys focussing on algorithms). Moreover, even the appropriate application of heuristics causes serious difficulties because the number and the value range of the parameters to be taken into account as well as the diversity of the existing algorithms exceed what is intuitively comprehensible and there is still a lack of systematic, theoretically sound selection criteria (Burke et al., 2013).

Consequently, hyper heuristics address a central question of a hybrid PPC: How can AI (especially ML algorithms) be utilized to create heuristics for solving practically relevant PSPs in an automated way but also including human expertise provided by production environment?

Simulations play an important role in answering this research question in two respects (Kuck et al., 2016): Firstly, simulation results form the data basis (training data and test instances) on which ML algorithms build up hyper heuristics. Secondly, simple low-effort simulations can be part of the heuristic itself, i. e. methods which simulate a selected part of the problem (tree) in the ongoing production process can also be considered in order to make an updated heuristic (or even human) decision based on those results, cf. (Zhang et al. 2020). Such approaches are useful if the PPC problem is stochastically influenced.

This paper is organized as follows: Section 2 defines the scope of the considered problem class, namely stochastic multi-mode multi-project resource-constrained project scheduling problems with transfer times (MMMPRCPSPTT). The structure of hyper heuristics based on Boolean operations is explained in Section 3. The last two sections turn the focus from rather theoretical modelling to the practical implementation of the simulation framework (Section 4) and numerical results (Section 5).

2 Stochastic Multi-Mode Multi-Project Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Setup Times

During the last years, multi-mode multi-project resource-constrained project scheduling problems (MMMPRCPSP) drew a great research interest because they arise in many logistic contexts (Issa and Tu, 2020; Gonçalves et al., 2008; Singh, 2014; Zhu et al., 2021; Pritsker et al., 1969), e. g. an SME or any customized manufacturer offering a certain range of products (projects) manufactured in a factory hall (containing the limited resources which can be both machines or employees) has some freedom in how the steps of creating a product can be executed (modes) within the working plan. Some practical relevant features required extensions, namely:

1. Stochastic influences: The durations of working processes deviate from time to time which means that job durations should rather be modelled by random variables of a certain distribution (see below) than by fixed values.

2. Transfer times: Between two different jobs, machines have to be retooled or reconfigured which causes additional time. Therefore, for each combination of two jobs a not necessarily deterministic transfer time increment is introduced.

After giving this intuitive outline, let us now turn to a more formal definition of a stochastic MMMPRCPSPTT.

- resources: $r = 1 \dots R$ with C_r independent capacity units, C_r is a discrete random variable of a given distribution
- projects: $p = 1 \dots P$ consisting of J_p jobs respectively

For each p fixed, we have

- jobs: $j = 1 \dots J_p$ with available modes $m = 1 \dots M_{pj}$ and the respective durations D_{pjm} as discrete random variables and required resource slots K_{pjm_r} while being in process
- successor matrix $S_p \in \{0,1\}^{J_p \times J_p}$ defined by:

$$S_{pj_1j_2} := \begin{cases} 1, & \text{if job } j_2 \text{ follows after job } j_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- setup times $T_{p_1\hat{p}_2\hat{j}} :=$ time increment, if job \hat{j} of project p_1 is directly followed by job \hat{j} of project p_2 on resource r (considered as discrete random variables as well)

In summary, a stochastic MMMPRCPSPTT is characterized by the tuple $\{R, P, (J_p), (M_{pj}), (D_{pjm}), (S_{pj_1j_2}), (K_{pjm_r}), (T_{p_1\hat{p}_2\hat{j}})\}$ with $1 \leq p, p_1, p_2 \leq P, 1 \leq r \leq R, 1 \leq j, j_1, j_2 \leq J_p, 1 \leq m \leq M_{pj}, 1 \leq \hat{j} \leq J_{p_1}, 1 \leq \hat{j} \leq J_{p_2}$. Please note the following remarks:

- Each job is only started once and simultaneously in exactly one mode on all necessary resources and must not be paused.
- The slots of a resource can be occupied and switched independently.

Since we refrain here from a precise mathematical modelling, we will not further elaborate formal details and refer the interested reader to the literature (e. g. (Pritsker et al., 1969; Lova et al., 2006; Krüger and Scholl, 2009; Liu et al., 2023; Neumann, 2003; Artigues et al., 2003)). Comparing to classical MMMPRCPSPs, the defined stochastic MMMPRCPSPTT come closer to what we call reality but demand at the same time more efforts to find at least acceptable solutions within at least acceptable time horizons. Here, heuristics enter the game.

3 Hyper Heuristics Based on Boolean Operations

In our approach, the creation of hyper heuristics serving as priority rules is based on the choice and evaluation of quantities characterizing the problem and the process (see below for the complete list)

Global attributes:

number_executable_modes	number_executable_projects
number_executable_jobs	foreach_setup_needed

Process attributes:

DirectSuccessorCount	
DirectSuccessorSumMaxProcessingTime	
DirectSuccessorSumMinProcessingTime	
ProjectStartTime	ProjectFinishTime
Resources	Duration
SetupNeeded	SetupTime
TotalSuccessorCount	
TotalSuccessorSumMaxProcessingTime	
TotalSuccessorSumMinProcessingTime	
WaitingJobCount	WaitingTime

where for each of the process attributes the sum, the mean, the median, the span length and the standard deviation can be computed (regarding the current queue).

These are nested via combination of Boolean operators such as conjunction or disjunction. A priority rule is built up as a tree of elementary rules of the form:

```

if: quantity1 ~ parameter1
then: rule1
else: rule2

```

where $rule_{1/2} \in \{FIFO, LIFO, MWKR, SPT\}$ (first-in-first-out, last-in-first-out, most-work-remaining, shortest-processing-time) and \sim symbolizes a binary relation, i. e. $\sim \in \{\leq, <, >, \geq\}$. More formally, the set of all priority rules Z can be constructed recursively by setting $FIFO, LIFO, MWKR, SPT \in Z$ and by claiming that the rule defined by

```

if: condition
then: rule1
else: rule2

```

is element of Z for all $rule_{1/2} \in Z$ and all valid conditions of the form
 $(quantity_1 \sim parameter_1) o_1 (quantity_2 \sim parameter_2) o_2 \dots$

where o_i symbolize Boolean operations. In summary, a heuristic depends on its tree structure, on the chosen set of quantities, the respective parameter values, the respective order relation and the chosen Boolean operations which yields such a variety that ML algorithms become necessary to handle it.

4 Simulation Framework

In this section, we present our simulation framework following the ‘life cycle’ of an optimization process (see Fig. 1 for a scheme).

Step 1: Generation of project templates

For each of the P projects, we use a classical Kolisch programme (Kolisch, 1996; Kolisch and Sprecher, 1997) to create a deterministic MMRCPSP.

Step 2: Extension process

We have developed an extension process both to incorporate random variables and setup times as well as to unify all MMRCPSPs of step 1 to a single MMMPRCPSPTT. In more detail, a random number generator scatters logarithmically normal distributed random numbers around the deterministic values taken as expectation values of each MMRCPSP and the standard deviations are evaluated via a global, manual adjustment of the coefficient of variation (CV). The setup times are generated analogously where a uniform expectation value and a uniform standard deviation enter by manual input. The unification means essentially unifying the working plans ($S_{p_j j_2}$), assigning the resources and reevaluation their capacities to ensure principal solvability. Note that the extension process as well allows the generation of fully or partially deterministic MMMPRCPSPTT.

Step 3: Simulation

A given heuristic according to Section 3 (encoded e. g. in a json file) serves together with a stochastic MMMPRCPSPTT according to Section 2 as input for the Java-based simulation framework, whose core is implemented using a DESMO-J framework for discrete-event modelling and simulation (Lechler and Page, 1999).

Each realization of the stochastic problem instance is executed independently. The simulator comprises two events: 1) start of the first job, which initializes the simulation, and 2) start of the successor jobs, fired each time a running job is finished. The new jobs are selected from the list of currently available jobs and resources, according the given heuristic. As soon as all the jobs are executed, the framework returns the value of the specified objective functions, e. g. cycle time, project delay or make span.

Step 4: Optimization

We envisage a fast simulation to be potentially applied in real-time scenarios, and we use a standard genetic algorithm (Wilhelmstötter, 2023) which starts with a randomly generated initial population.

In Section 5 we show some facets selected from steps 2, 3 and 4. As an extra aspect intended to further populate the topic we are going to establish a library of problems (analogue to MPSPLib (Hombberger, 2023)) providing access to stochastic MMMPRCPSPTT files (incl. search function and information about each file), allowing for submission of solutions (incl. visualization of the solution (see Fig. 2), check for correctness and ranking of all solutions).

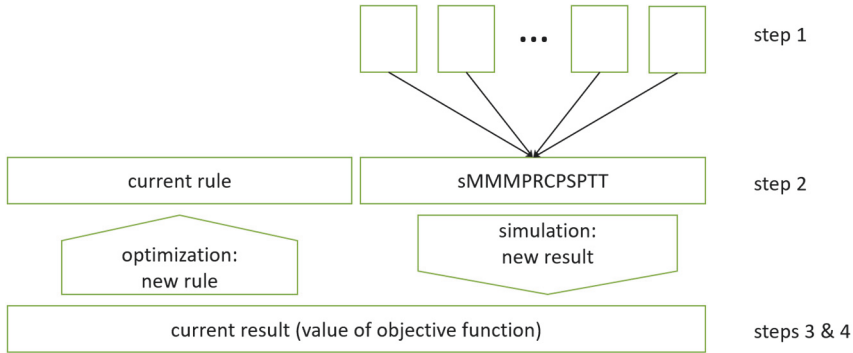


Figure 1: Scheme of simulation framework, the problem creation (steps 1 & 2) followed by an iterative optimization process (steps 3 & 4), where simulation and optimization alternate

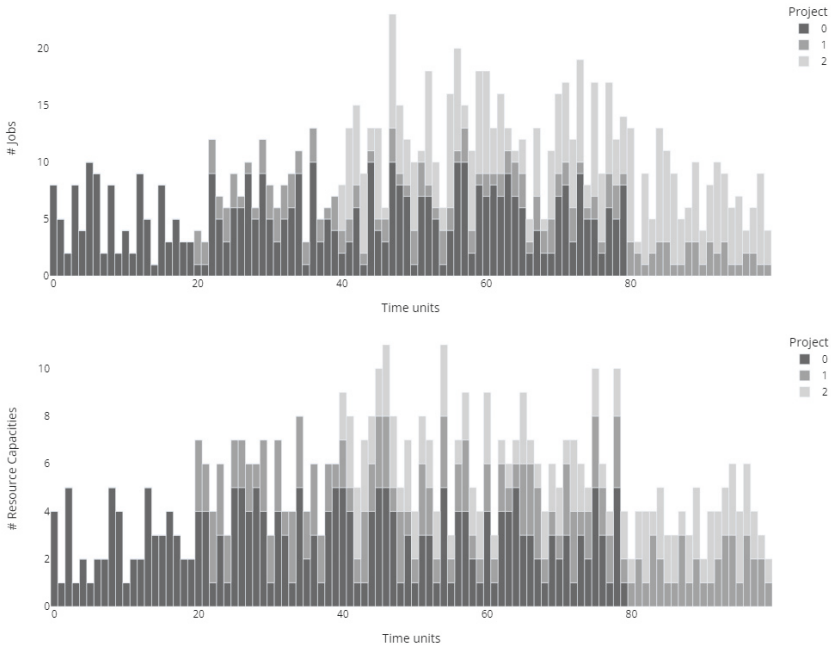


Figure 2: Visualization of a solution by exhibiting the project processing (upper panel) and the resource occupation (lower panel).

5 Selected Numerical Results

The simulation uncovers interesting relations between FIFO, LIFO, MWKR and SPT applied to a large sample of stochastic MMMPRCPSPTT: the cycle times depend nearly linearly on each other (see Fig. 4) which allows for estimating the cycle time by another reducing the effort of the simulations.

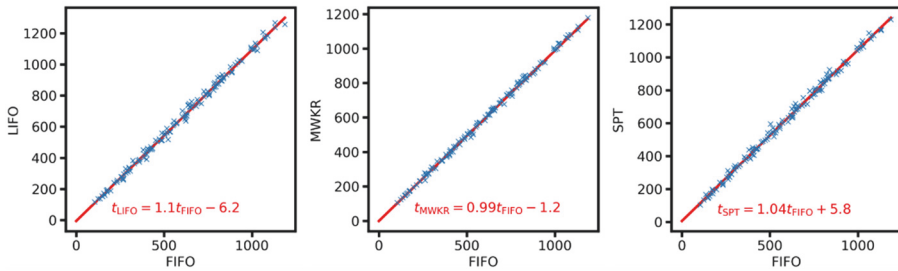


Figure 3: Cycle time of LIFO (left), MWKR (middle) and SPT (right) as a function of the FIFO cycle time with the respective linear best approximation displayed as thin line. The underlying sample covers 140 deterministic MMMPRCPSPT with $J=30 \dots 90$ jobs, $R=4 \dots 10$ resources and $P=1 \dots 200$ projects.

Considering stochastic MMMPRCSPs means facing the new quality that the objective functions are random variables as well and therefore display a distributional behaviour which could be subject to further investigations. As a glimpse, Fig. 5 exhibits the distribution if an elementary priority rule is applied. Fig. 6 shows by comparing coefficients of variation that the values of the cycle time as objective function spread to a lesser extent than the input variables.

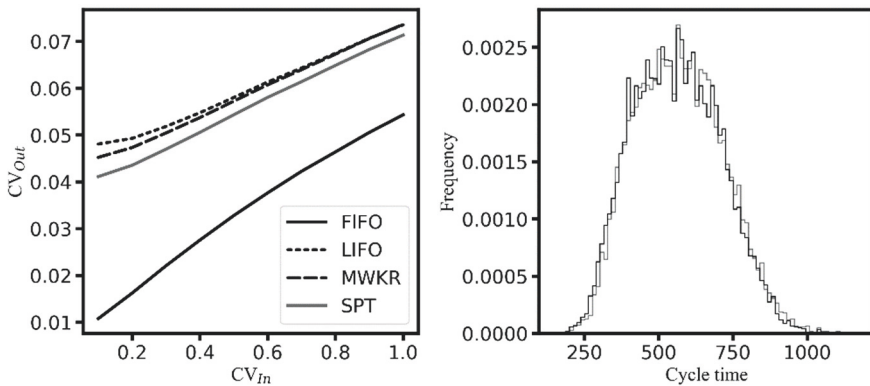


Figure 4: Left: CV of the cycle time (CV_{Out}) as a function of the CV_{In} of all durations and capacities (see Section 2). The fact $CV_{Out} \ll CV_{In}$ underlines that the values of the objective function are more concentrated than the input values. Right: Distribution of the cycle time achieved using one of the elementary rules for 10000 realizations of one stochastic MMMPRCSP with 1 project, 10 jobs and 4 resources. For enhanced visibility only the distributions of FIFO and SPT are displayed.

Let us consider again the cycle time for the priority rule

```

if: number_executable_modes  $\leq$  W or mean_duration  $\leq$  D
then: MWKR
else: FIFO

```

where the parameters W and D serve as target variables of the optimization.

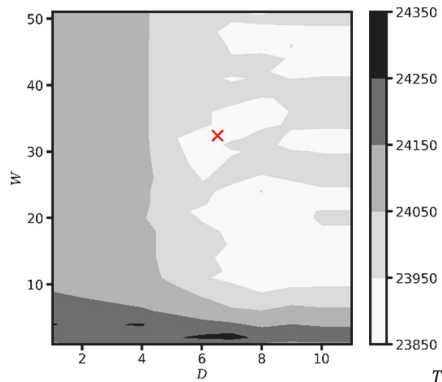


Figure 6: Contour plot of the cycle time T as a function of the parameters D and W of the priority rule given above. The minimum of $T_{min} = 23894$ marks the red cross. The horizontal and vertical stripes were found to be characteristic in systematic investigations and represent areas in which no minimum is to be expected, so that these can be excluded from the search for optimal parameters.

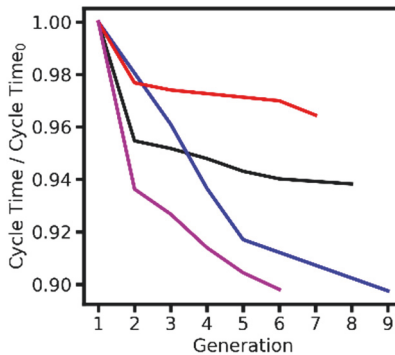


Figure 7: Evolution of the scaled cycle time (mean) throughout the application of the genetic algorithm for four selected stochastic MMMPRCSPSTT (distinguished by coloured graphs). Although the number of generations is rather small and the total number of individuals was limited by 2000, there are improvements from about 3 % to about 10 %.

Clearly, the optimization is not only limited to varying the parameters of a fixed priority rule (as above) but also includes the variation of all components. Fig. 7

exhibits the evolution of the cycle time as objective function over the generation for some selected problem instances.

6 Summary and Outlook

As shown above, a comprehensive simulation tool allows for manoeuvring through the field of stochastic MMMPRCPSPTT, delivers new insights and uncovers previously hidden relations. However, this is to be considered as a starting point for further investigations, e. g. systematic studies to elaborate probability distributions of objective functions. Another important avenue leads to practical applications in terms of real-time simulations and human biases.

Acknowledgement

The work of MK and RZ is supported by DFG project 418727532. The authors gratefully thank Dmytro Pukhkaiev and Richard Lux for their comments and the valuable contributions to the project.

References

- Artigues, C.; Demassey, S.; Néron, E.: *Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications*. New York, NY: John Wiley & Sons 2013.
- Artigues, C.; Michelon, P.; Reusser, S.: Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research* 149 (2003) 2, pp. 249–267.
- Branke, J.; Nguyen, S.; Pickardt, C.W.; Zhang, M.: Automated Design of Production Scheduling Heuristics: A Review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 20 (2016) 1, pp. 110–124.
- Burke, E.K.; Gendreau, M.; Hyde, M.; Kendall, G.; Ochoa, G.; Özcan, E.; Qu, R.: Hyper-heuristics: a survey of the state of the art. *Journal of the Operational Research Society* 64 (2013) 12, pp. 1695–1724.
- Durasević, M.; Jakobović, D.: Heuristic and metaheuristic methods for the parallel unrelated machines scheduling problem: a survey. *Artificial Intelligence Review* 56 (2023) 4, pp. 3181–3289.
- Gonçalves, J.F.; Mendes, J.; Resende, M.: A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 189 (2008) 3, pp. 1171–1190.
- Guo, H.; Liu, J.; Zhuang, C.: Automatic design for shop scheduling strategies based on hyper-heuristics: A systematic review. *Advanced Engineering Informatics* 54 (2022), pp. 101756.
- Hartmann, S.; Briskorn, D.: An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 297 (2022) 1, pp. 1–14.
- Homerberger, J., 2023: mpsplib.com | MULTI PROJECT SCHEDULING PROBLEM LIBRARY |. Online available at: <http://mpsplib.com/>, last updated 07.05.2023, last checked 07.05.2023.

- Issa, S.; Tu, Y.: A survey in the resource-constrained project and multi-project scheduling problems. *Journal of Project Management* 5 (2020) 2, pp. 117–138.
- Kolisch, R.: Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation. *European Journal of Operational Research* 90 (1996) 2, pp. 320–333.
- Kolisch, R.; Sprecher, A.: PSPLIB - A project scheduling problem library. *European Journal of Operational Research* 96 (1997) 1, pp. 205–216.
- Krüger, D.; Scholl, A.: A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-)project scheduling problem with sequence-dependent transfer times. *European Journal of Operational Research* 197 (2009) 2, pp. 492–508.
- Kuck, M.; Ehm, J.; Hildebrandt, T.; Freitag, M.; Frazzon, E.M.: Potential of data-driven simulation-based optimization for adaptive scheduling and control of dynamic manufacturing systems. In: 2016 Winter Simulation Conference (WSC), 2016,
- Lechler, T.; Page, B.: DESMO-J: An object oriented discrete simulation framework in Java Proceedings of the 11th European Simulation Symposium (1999), pp. 46–50.
- Liu, Y.; Jin, S.; Zhou, J.; Hu, Q.: A branch-and-bound algorithm for the unit-capacity resource constrained project scheduling problem with transfer times. *Computers & Operations Research* 151 (2023), pp. 106097.
- Lova, A.; Tormos, P.; Barber, F.: Multi-mode resource constrained project scheduling: scheduling schemes, priority rules and mode selection rules. *Inteligencia Artificial* 10 (2006) 30.
- Luo, J.; Vanhoucke, M.; Coelho, J.; Guo, W.: An efficient genetic programming approach to design priority rules for resource-constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications* 198 (2022), pp. 116753.
- Neumann, K.: Project scheduling with changeover times—Modelling and applications 2003.
- Pritsker, A.A.; Waiters, L.J.; Wolfe, P.M.: Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach. *Management Science* 16 (1969) 1, pp. 93–108.
- Singh, A.: Resource Constrained Multi-project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process. *Procedia Engineering* 69 (2014), pp. 725–734.
- Snauwaert, J.; Vanhoucke, M.: A classification and new benchmark instances for the multi-skilled resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 307 (2023) 1, pp. 1–19.
- Wilhelmstötter, F., 2023: Jenetics: Java Genetic Algorithm Library. Online available at: <https://jenetics.io/>, last updated 03.05.2023, last checked 08.05.2023.
- Zhang, F.; Mei, Y.; Nguyen, S.; Zhang, M.: Guided Subtree Selection for Genetic Operators in Genetic Programming for Dynamic Flexible Job Shop Scheduling. In: *Genetic Programming*, (2020), pp. 262–278.
- Zhang, F.; Mei, Y.; Nguyen, S.; Zhang, M.: *Programming for Production Scheduling* (2021).
- Zhu, L.; Lin, J.; Li, Y.-Y.; Wang, Z.-J.: A decomposition-based multi-objective genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Knowledge-Based Systems* 225 (2021), pp. 107099.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Iterative optimierungsbasierte Simulation in der Praxis – Simulation der Oberflächenveredelung der Salzgitter Flachstahl GmbH

Iterative Optimization-based Simulation in Practice – Simulation of the Surface Finishing at Salzgitter Flachstahl GmbH

Patrick Oetjegerdes, Christian Weckenborg, Thomas Stefan Spengler, TU Braunschweig, Braunschweig (Germany), p.oetjegerdes@tu-braunschweig.de, c.weckenborg@tu-braunschweig.de, t.spengler@tu-braunschweig.de
Udo Vogeler, Mike Molzberger, Salzgitter Flachstahl GmbH, Salzgitter (Germany), vogler.u@salzgitter-ag.de, molzberger.m@salzgitter-ag.de

Abstract: The Salzgitter Flachstahl GmbH plans a shift in their production program, which might require adaptations in the logistics. A discrete event simulation model is used to evaluate the impact of the new production program on logistics and the effects of various adaptations. In practice, however, optimization algorithms are applied in this system to facilitate resource planning, e.g., for loading train wagons or crane scheduling. To develop a valid production system model, it was necessary to implement optimization algorithms directly within the simulation and execute them iteratively during the simulation run. Using this approach, different adaptations of the logistic system could be evaluated. The approach to implementing iterative optimization-based simulation in practice and the lessons learned are reported.

1. Einleitung

Auf Basis einer angepassten Absatzplanung stellt die Salzgitter Flachstahl GmbH (SZFG) ihr Produktionsprogramm um. Unter anderem wird in eine neue Anlage für die Feuerverzinkung von Stahlcoils investiert, die die bisherige Produktionsmenge des Produktionsbereichs der Oberflächenveredelung um etwa 30 % erhöht. Der Bereich der Oberflächenveredelung ist als Werkstattfertigung organisiert und der durchschnittliche Bestand an kundenindividuell produzierten Stahlcoils beträgt etwa 7.500 Stück. Diese wiegen bis zu 32 Tonnen und können nur mit Kränen, Zügen, LKWs und Spezialfahrzeugen transportiert werden. Durch die hohe Anzahl kundenindividueller Produkte, das hohe Produktgewicht und die Organisation als Werkstattfertigung gestaltet sich die Logistikplanung komplex. Im Rahmen der Logistikplanung werden aus diesem Grund unterschiedliche optimierende Verfahren

genutzt, beispielsweise für die Kransteuerung, die Routenplanung eines fahrerlosen Transportsystems oder für die Beladung von Zugwaggons.

Um eventuell auftretende Engpässe der Logistik in diesem Produktionssystem auf Grund der Anpassung des Produktionsprogramms zu prognostizieren und gegebenenfalls rechtzeitig passende Maßnahmen zur Engpassauflösung einzuleiten, empfiehlt sich die Nutzung einer ereignisdiskreten Simulation, wie sie häufig für diese Art von Problemen in der Industrie genutzt wird (Gutenschwager et al. 2017). Dieser klassische Ansatz wurde auch zunächst von der SZFG genutzt. Jedoch führt das veränderte Produktionsprogramm nicht nur zu einer intensiveren Nutzung der Ressourcen (Kräne, Lagerflächen, Züge, usw.), sondern auch zu einer veränderten Nutzung, da z.B. die Produkte des angepassten Produktionsprogramms im Durchschnitt eine höhere Masse besitzen. Diese veränderte Nutzung spiegelt sich in veränderten Parametern der optimierenden Verfahren wider. Eine Modellierung, die lediglich historische beobachtete Daten berücksichtigt, führt nicht zu einer validen Modellierung. Stattdessen ist es notwendig die optimierenden Verfahren selbst zu modellieren, sodass die Reaktion auf die veränderten Parameter korrekt prognostiziert wird.

Diese Implementierung optimierender Verfahren in einem Simulationsmodell wird als iterative optimierungsbasierte Simulation bezeichnet (Figueira und Almada-Lobo 2014). Ausgelöst durch ein eintretendes Ereignis (z.B. der Eintritt eines Zugs zum Abtransport von Produkten), wird während des Simulationslaufs ein optimierendes Verfahren aufgerufen. Hierzu werden durch die Simulation ermittelte Parameter an das optimierende Verfahren übergeben, welches dann Entscheidungen trifft und diese an die Simulation zurückgibt. Diese Entscheidungen werden dann im weiteren Ablauf der Simulation umgesetzt (siehe Abbildung 1).

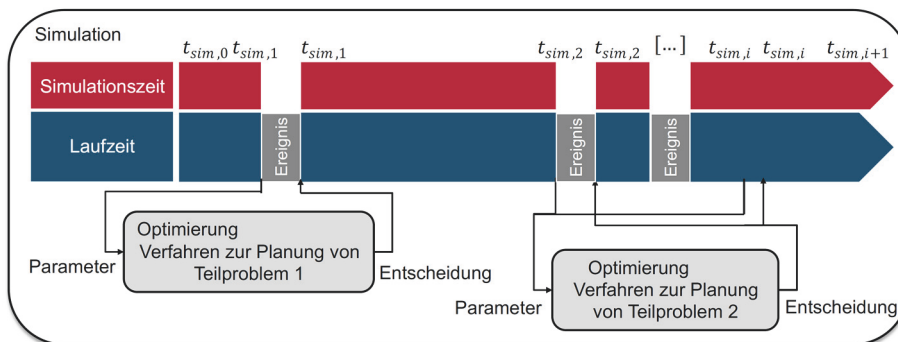


Abbildung 1: Funktionsweise iterativer optimierungsbasierter Simulationen.

Iterative optimierungsbasierte Simulationen werden zum Teil bereits in der Forschung diskutiert (siehe Kapitel 3) und auch entsprechende Richtlinien beschreiben die Methode (Verein Deutscher Ingenieure 2020). In diesem Beitrag hingegen wird der Einsatz einer iterativen optimierungsbasierten Simulation in der Praxis beschrieben – anhand einer Fallstudie in der komplexen und hochautomatisierten Oberflächenveredelung der Salzgitter Flachstahl GmbH. So wird der Diskurs durch einen Praxisbericht mit Erfahrungen der Anwendung aus der Praxis erweitert. Anhand

des Beispiels der Beladung von Zugwaggons in diesem System werden die Funktionsweise und Implementierung dargestellt und die Ergebnisse einer Modellierung auf Basis historischer Daten aufgezeigt. Hierzu werden zunächst in Kapitel 2 die Oberflächenveredelung als Untersuchungsgegenstand und die Herausforderungen im Rahmen der Modellierung als Simulationsmodell beschrieben. In Kapitel 3 wird anschließend ein Überblick über die Literatur zur iterativen optimierungsbasierten Simulation gegeben. In Kapitel 4 wird eines der Planungsprobleme des Produktionssystems fokussiert, um die Auswirkungen der direkten Integration optimierender Verfahren in die Simulation zu veranschaulichen. Auf Basis dieser Fallstudie werden die Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz von iterativen optimierungsbasierten Simulationen in der Praxis beschrieben. Das Kapitel 5 schließt mit einer Zusammenfassung.

2. Beschreibung des Untersuchungsgegenstands

Die Oberflächenveredelung (OV) ist die letzte Produktionsstufe der Produktion von Flachstahl (Wichmann 2014). In dieser Stufe wird das Stahlband, welches zu einem Stahlcoil aufgewickelt transportiert wird, mit Zink oder organischen Stoffen beschichtet und gemäß der Auftragsvorgabe des Kunden adjustiert und versandt. Zunächst wird im Folgenden das Produktionssystem der Oberflächenveredelung der Salzgitter Flachstahl GmbH (SZFG) beschrieben.

Für die Oberflächenveredelung stehen sechs Anlagen zur Verfügung: drei für die Feuerverzinkung, eine für die elektrolytische Verzinkung, eine für die organische Bandbeschichtung und eine für die Coiladjustage. Jede dieser Anlagen führt einen kontinuierlichen Produktionsprozess durch, bei dem je nach Anlage bis zu 500.000 t Stahl pro Jahr veredelt werden. Es ist auch möglich, dass Stahlcoils mehrere Anlagen durchlaufen. Beispielsweise wird das Produkt zuerst feuerverzinkt, anschließend organisch beschichtet und zuletzt in der Coiladjustage entsprechend den Vorgaben des Kunden zugeschnitten. Welche Anlagen durchlaufen werden, ist abhängig vom Kundenauftrag. Insgesamt sollen in der OV gemäß dem angepassten Produktionsprogramm 30 % mehr veredelter Stahl pro Jahr produziert werden.

Die Stahlcoils haben ein Gewicht von 8–32 t pro Stück und werden vor allem mit Hilfe von Portalkränen und einem fahrerlosen Transportsystem zwischen den Anlagen transportiert. Zu jedem Zeitpunkt liegen etwa 7.500 kundenindividuelle Stahlcoils (Zwischenmaterial, Fertigmateriale und Konzessionsmaterial) in der OV in Stahlcoillagern. Diese Stahlcoillager bestehen aus Mulden, mit deren Hilfe die Stahlcoils in bis zu zwei Lagen gestapelt werden können. Auf diese Weise stehen in dem Bereich OV etwa 12.000 Lagerplätze zur Verfügung, jedoch existieren außerhalb des Bereichs der OV weitere Lagerplätze. Insgesamt hat der Bereich eine Größe von etwa 175.000 m².

Anschließend an die Veredelungsprozesse erfolgt der Versand per LKW oder Zug aus dem Bereich OV. An jedem Werktag wird eine hohe zweistellige Zahl von LKWs beladen. Für den Abtransport per Zug stehen 4 Gleise zur Verfügung. Die Modellgrenze der Simulation stellt der Eintritt von Stahlcoils in den Bereich OV dar sowie der Abtransport per LKW, internem Spezialtransporter oder Zug. Eine schematische Darstellung des Produktionssystems findet sich in Abbildung 2.

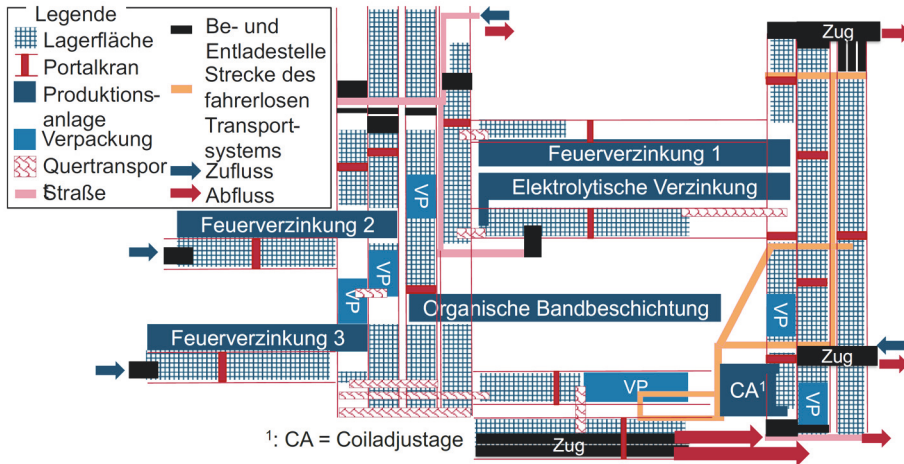


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Oberflächenveredelung

Im Rahmen der Logistikplanung müssen verschiedene Planungsprobleme gelöst werden. Beispielsweise muss im Rahmen der Kransteuerung entschieden werden, in welcher Reihenfolge die Stahlcoils transportiert werden und welche Plätze ihnen in den Stahlcoillagern zugewiesen werden. Das fahrerlose Transportsystem transportiert automatisch zwischen verschiedenen Bereichen des Produktionssystems eine niedrige dreistellige Zahl von Stahlcoils. Es muss sowohl eine Reihenfolge für den Transport bestimmt werden als auch eine Routenplanung für die einzelnen Fahrzeuge. Zudem werden auf vier Gleisen Zugwaggons mit Stahlcoils beladen. Es muss berücksichtigt werden, welche Stahlcoils verladen werden, sodass weder die maximale Zuladung pro Waggon noch die maximale Anzahl an Stahlcoils pro Waggon überschritten wird. Ziel ist es im Rahmen der Kundenaufträge die Beladung dieser Waggons hinsichtlich der abtransportierten Masse zu optimieren. Diese Planungsprobleme werden in der Realität typischerweise computerunterstützt mit Hilfe optimierender Verfahren (exakt und heuristisch) gelöst.

Im Rahmen der Modellierung dieses Produktionssystems wurden insbesondere drei Herausforderungen identifiziert:

- Modellierung des komplexen Produktionssystems
- Berücksichtigung der individuellen Kundenaufträge
- Modellierung der optimierenden Verfahren der Logistikplanung

In den übrigen Abschnitten konzentriert sich der Beitrag auf die Darstellung, wie die Herausforderung der Modellierung der optimierenden Verfahren gelöst wurde. Da die Veränderung des Produktionsprogramms – und die daraus resultierenden veränderten Parameter – einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der optimierenden Verfahren hat, wurden die optimierenden Verfahren direkt in die Simulation integriert. Auf diese Weise wird eine genauere Prognose der Auswirkungen des veränderten Produktionsprogramms auf das Produktionssystem erwartet. Im Folgenden wird ein Literaturüberblick über die Kombination von Simulation und Optimierung im Allgemeinen und die Verknüpfung als iterative optimierungsbasierte Simulation im Speziellen gegeben. Zudem wird der bisherige Einsatz von iterativen optimierungsbasierten Simulationen zusammengefasst.

3. Literaturüberblick

Eine Klassifikation und Taxonomie des kombinierten Einsatzes von Simulation und Optimierungen wird in Figueira und Almada-Lobo (2014) beschrieben. Zudem findet sich in der VDI-Richtlinie 3633 – Blatt 12 (2020) ein Überblick über die Verknüpfung von Simulation und Optimierung. Der Begriff der iterativen optimierungsbasierten Simulation (IOS) wurde von Figueira und Almada-Lobo (2014) geprägt. Mit diesem Begriff wird eine hierarchische Verknüpfung von Simulation und Optimierung beschrieben, bei der im Ablauf der Simulation an verschiedenen Stellen optimierende Verfahren aufgerufen werden. Die optimierenden Verfahren dienen hierbei der Lösungserzeugung zu Problemstellungen, die im Ablauf der Simulation auftreten (Figueira und Almada-Lobo 2014). Gemäß der VDI-Richtlinie 3633 – Blatt 12 (2020) entspricht die Methode der Integration der Optimierung in die Simulation (Kategorie C).

Detaillierte Berichte über den kombinierten Einsatz von Simulation und Optimierung in der Praxis finden sich in Gutenschwager (2002) und März et al. (2011). Kulkarni und Venkateswaran (2014) nutzen IOS für die Lösung der Maschinenbelegungsplanung in der Werkstattfertigung. Das optimierende Verfahren generiert eine mögliche Lösung, die mit Hilfe der Simulation auf ihre Gültigkeit überprüft wird. Anschließend wird der aktualisierte Lösungsraum erneut an die Optimierung übergeben. Dehghanimohammadabadi und Keyser (2015) stellen ein Framework für die Erstellung von IOS mit Hilfe der kommerziellen Tools SIMIO und Matlab vor und nutzen es erstmalig für ein Reihenfolgenplanungsproblem paralleler Maschinen. Fernandes et al. (2018) nutzen dieses Framework für die Bestimmung der Auftragsfreigabe in einem Fließproduktionssystem. Kapadia et al. (2019) nutzen dieses Framework für die Evaluation verschiedener Optimierungsverfahren für die Ablaufplanung in einem Produktionssystem für die additive Fertigung. Borodin et al. (2019) stellen einen Ansatz zur Kopplung der zwei kommerziellen Tools CPLEX und Arena im Rahmen einer IOS vor.

Dieser Literaturüberblick zeigt das Interesse an IOS in der Wissenschaft, insbesondere im Bereich der Ablaufplanung. Es findet sich jedoch kein Bericht über den Einsatz in der Praxis. Insbesondere findet sich kein Überblick über Herausforderungen, die ein Einsatz in der Praxis mit sich bringt und welche Rahmenbedingungen einen erfolgreichen Einsatz in der Praxis ermöglichen. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag die Umsetzung der Methode aus Praxissicht beschrieben.

4. Einsatz iterativer optimierungsbasierter Simulationen

In diesem Kapitel wird zunächst eine Fallstudie basierend auf einem Ausschnitt des Simulationsmodells der Oberflächenveredelung der SZFG im Detail vorgestellt und Auswirkungen der Integration des optimierenden Verfahrens auf Laufzeit und Ergebnisse dargestellt. Aufbauend auf der Diskussion der Ergebnisse werden Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz von IOS in der Praxis abgeleitet.

4.1 Vorstellung der Fallstudie

Ausgangslage für die Simulationsstudie ist eine Anpassung des Produktionsprogramms auf Grund einer veränderten Nachfrage sowie des Baus einer neuen Anlage, die die Gesamtausbringungsmenge des Bereichs OV um etwa 30 % erhöht. Neben der Erhöhung der Gesamtausbringungsmenge steigt auch das durchschnittliche Gewicht der Produkte im Produktionsprogramm um 5 %. Im Rahmen der Engpassanalyse des Logistiksystems war eine Fragestellung, unter welchen Umständen der Abtransport der erhöhten Produktionsmenge per Zug möglich ist.

Eine zentrale Fragestellung war, wie viele Waggons pro Tag beladen werden müssen, um einen Engpass im Stahlcoillager der südlichen Verladehalle zu vermeiden. Durch eine große Anzahl an Einflussfaktoren und Unsicherheiten, konnte diese Frage nicht analytisch bestimmt werden, weshalb eine Simulationsstudie vorgeschlagen wurde. Der durchschnittliche Bestand in der südlichen Verladehalle beträgt etwa 1.000 Stahlcoils. Diese Coils lagern hier bis zu ihrer Freigabe durch die Absatzplanung. Sobald diese erfolgt ist, werden sie gemäß der Beladungsplanung in Zugwaggons verladen und abtransportiert. Diese Fallstudie fokussiert sich auf die Implementierung der Beladungsplanung der Zugwaggons für den internen Transport zu dieser Versandhalle.

In einem ersten Schritt wurde zur Validierung das bestehende Produktionssystem mit dem ursprünglichen Produktionsprogramm modelliert. Dieses Modell wird im Folgenden als *Modell 1* bezeichnet. Nach abgeschlossener Validierung wurde das neue Produktionssystem modelliert. Insbesondere wurde die neue Anlage in das Modell eingefügt. Anschließend wurde das Modell auf Basis des neuen Produktionsprogramms parametrisiert. Dieses Modell wird im Folgenden als *Modell 2* bezeichnet.

Durch den Import einer Initialbelegung auf Basis einer Momentaufnahme aus dem Lagerverwaltungssystem, konnte eine Einschwingzeit von 30 Tagen bestimmt werden. Ein Simulationslauf umfasst eine Simulationsdauer von 180 Tagen. Für beide Szenarien wurden 15 voneinander unabhängige Simulationsläufe durchgeführt. Simuliert wurde mit Hilfe der kommerziellen Software Siemens Tecnomatix Plant Simulation 2201 auf einem Laptop mit Intel Core i7-1185G7 mit 3,0 GHz und 8 Threads und 32 GB RAM.

4.2 Integration des optimierenden Verfahrens

Im Folgenden wird beschrieben, wie das Planungsproblem der Beladung der Zugwaggons in die Simulation integriert und ausgeführt wurde.

Für den Abtransport stehen Züge mit 7 bis 10 Waggons zur Verfügung. Jeder Waggon kann bis zu fünf Stahlcoils aufnehmen, jedoch darf die Zuladung 100 t nicht übersteigen. Ziel der Beladungsplanung ist die Maximierung der abtransportierten Masse pro Waggon.

Die Beladungsplanung erfolgt iterativ für jeden einzelnen Waggon statt für den gesamten Zug simultan. Auch wenn die simultane Planung der Beladung des gesamten Zugs eine noch bessere Auslastung des Zuges ermöglichen würde, entspricht dies nicht dem Vorgehen in der Realität. Dies hat vor allem organisatorische Gründe. Die Beladung eines Waggons benötigt etwa eine halbe

Stunde. Zwischen Beladung des ersten und letzten Waggons eines Zugs können entsprechend bis zu 5 Stunden vergehen. In der Zeit zwischen Beladung des ersten und letzten Waggons verändert sich die Menge für die Verladung freigegebenen Coils deutlich. Entsprechend wird für jeden Waggon neu geplant.

Die Planung der Beladung eines Zugs wird durch das Ereignis „Eintritt Zug“ ausgelöst. Aus der Menge an freigegebenen Stahlcoils, die auf die Verladung warten, wird die Teilmenge bestimmt, die die Zuladung für einen Waggon maximiert. Hierzu wird ein optimierendes Verfahren aufgerufen, welches diese Teilmenge bestimmt. Anschließend werden diese Stahlcoils verladen. Sobald der Verladevorgang abgeschlossen ist, wird erneut überprüft, welche Stahlcoils für die Verladung auf den nächsten Zugwaggon zur Verfügung stehen und eine Teilmenge für die Verladung bestimmt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Zugwaggons und damit der Zug vollständig beladen ist.

Im vorliegenden Fall wurde die Beladungsplanung durch vollständige Enumeration gelöst. Die Laufzeit des Modells wurde aufgrund der geringen Anzahl von durchschnittlich acht freigegebenen Stahlcoils nicht stark beeinflusst (siehe Kapitel 4.3). Sofern mehr als 12 Stahlcoils für die Verladung freigegeben wurden, wurden nur 12 Stahlcoils für die Beladung in Betracht gezogen, die die geringste verbliebende Zeit bis zur Auftragsfertigstellung haben. Auf diese Weise wurde der exponentiell ansteigende Rechenaufwand begrenzt. Dieses optimierende Verfahren wurde auf Grund der hohen Anzahl an Aufrufen und geringen Laufzeit direkt in der Simulationssoftware implementiert. Grundsätzlich gibt es jedoch mehrere Alternativen zur Integration der optimierenden Verfahren. Diese werden inklusive der spezifischen Vor- und Nachteile in Abschnitt 4.4 diskutiert.

4.3 Ergebnisse der Fallstudie

Zunächst wurde das Simulationsmodell inklusive des optimierenden Verfahrens mit Hilfe des Modells 1 validiert. Hierzu wurde die durchschnittliche transportierte Masse und Anzahl an abtransportierten Stahlcoils pro Zug insgesamt und pro Waggon mit historischen Daten verglichen sowie intensiv mit den Experten im Unternehmen besprochen. Nachdem sowohl Simulationsmodell als auch das integrierte optimierende Verfahren validiert wurden, wurde Modell entsprechend der Parameter des Modells 2 angepasst. Durch eine iterative Erhöhung der Anzahl an beladenen Waggons pro Tag von ursprünglich 8,3 im Modell 1 auf 13,3 im Modell 2 konnte ein Engpass in dem Stahlcoillager in der südlichen Verladehalle vermieden werden.

Jedoch hat sich wie erwartet die Beladung der Waggons verändert. Während im Modell 1 durchschnittlich pro Waggon 4,7 Stahlcoils mit einer durchschnittlichen Masse von 93,07 t verladen wurden ($n = 18.675$), wurden im Modell 2 durchschnittlich 4,6 Coils (-0,7 %) mit einer durchschnittlichen Masse von 94,63 t (+1,7 %) verladen ($n = 29.880$). Auch wenn diese Werte auf den ersten Blick nur auf geringe Abweichungen hindeuten, entspricht dies einem zusätzlichen Bedarf von 5,3 Zügen bzw. 42,3 zusätzlichen Waggons pro Monat, um einen Anstieg des Bestands auf Grund der veränderten Zuladung pro Waggon zu verhindern. Eine graphische Darstellung der Verteilung der Beladung der Waggons findet sich in Abbildung 3 und Abbildung 4.

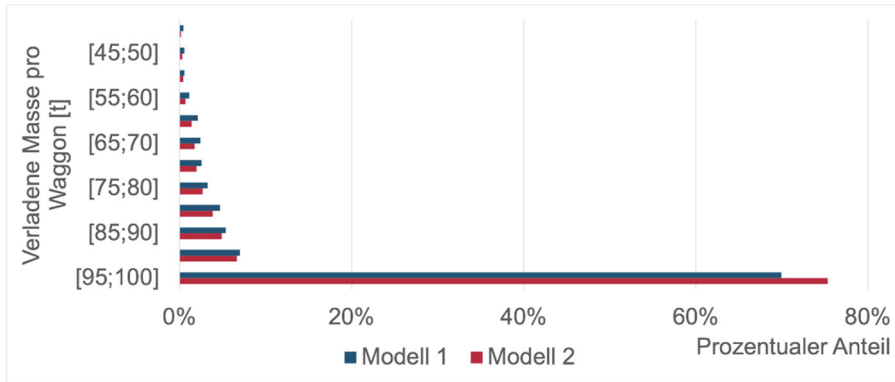


Abbildung 3: Verladene Masse pro Waggon in den zwei Szenarien

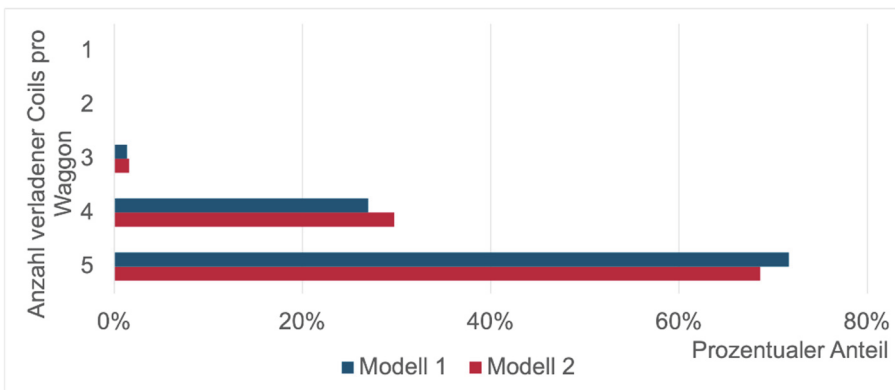


Abbildung 4: Verladene Anzahl Stahlcoils pro Waggon in den zwei Szenarien

Bei der Entwicklung von IOS ist zwischen einer hohen Laufzeit und einem hohen Detaillierungsgrad abzuwägen. Dies ist abhängig von dem zeitlichen Horizont der Fragestellung (strategisch, taktisch, operativ), von der Anzahl der untersuchten Szenarien und von der statistischen Absicherung. Im vorliegenden Modell benötigt ein Simulationslauf im Durchschnitt 24,7 Minuten für die Simulation von 180 Tagen für ein taktisches Problem mit einer begrenzten Anzahl zu untersuchenden Szenarien. Für diesen konkreten Anwendungsfall wurde die Laufzeit entsprechend als angemessen betrachtet. Für die Bestimmung zu verladender Stahlcoils wurde im Durchschnitt 0,20 ms pro Waggon benötigt. In Summe entspricht dies bei der Beladung von 29.880 Waggons einer zusätzlichen Laufzeit von etwa 6 s (0,4 % der Gesamtlaufzeit) durch die Integration dieses optimierenden Verfahrens. Die Implementierung dieses Verfahrens hat folglich keinen großen Einfluss auf die Laufzeit des Gesamtmodells. Die Implementierung anderer optimierender Verfahren in diesem Simulationsmodell hat jedoch einen größeren Einfluss. So resultiert beispielsweise die Implementierung der Kransteuerung in der südlichen Verladehalle als optimierendes Verfahren in einer zusätzlichen Laufzeit von 3,49 Minuten (14,8 % der Gesamtlaufzeit). Es muss folglich im Einzelfall darüber entschieden werden, welche Art der Modellierung geeignet ist. Hierzu wird im folgenden Kapitel eine Hilfestellung aus Praxissicht gegeben.

4.4 Ableitung von Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz von IOS in der Praxis

Grundsätzlich stehen verschiedene Möglichkeiten für die Integration des optimierenden Verfahrens zur Verfügung:

- Implementierung des optimierenden Verfahrens direkt in der Simulationssoftware.
- Implementierung des optimierenden Verfahrens in einer dafür geeigneten zusätzlichen Software (z.B. Software zur mathematischen Optimierung) und Programmierung entsprechender Schnittstellen zum Datenaustausch.
- Implementierung einer Schnittstelle in der Simulationssoftware direkt zu der Software, die das Planungsproblem im realen Produktionssystem löst.

Im Rahmen der Modellierung des Produktionssystems wurden alle Möglichkeiten evaluiert und Vor- und Nachteile abgewogen. Eine Übersicht wird in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Möglichkeiten optimierende Verfahren in Simulationen einzubinden

	Direkte Integration	Nutzung von Spezialsoftware	Nutzung einer Schnittstelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung einer einzelnen Software und Lizenz • Keine erhöhte Laufzeit durch Datenaustausch • Auswertung direkt in der Simulationssoftware 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von auf das Verfahren zugeschnittener Software • Schnellstmögliche Lösungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Lösung mit exakt demselben Verfahren, wie in der Realität • Kein Programmieraufwand für das optimierende Verfahren • Ein wichtiger Schritt zur Erschaffung eines digitalen Zwillings
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Heuristiken und Algorithmen müssen neu entwickelt werden • Das Lösungsverfahren ist oftmals langsamer • Funktionalität durch Simulationssoftware begrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Heuristiken und Algorithmen müssen neu entwickelt werden • Ggf. zusätzliche Kosten durch weitere Lizenz • Höhere Laufzeit durch Datenaustausch 	<ul style="list-style-type: none"> • Belastung von Produktivressourcen oder Investition in eine Kopie (von Teilen) des Produktionssystems • Alle Parameter, die für das Lösungsverfahren genutzt werden, müssen realitätsidentisch vorliegen
Empfehlung	Geeignet für einfache Verfahren, die nur eine geringe Laufzeit haben und häufig aufgerufen werden	Geeignet für komplexe Verfahren mit hoher Laufzeit	Geeignet für komplexe Verfahren, bei denen die Lösungsfindung schwer modellierbar oder unbekannt ist

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Anwendung von IOS in der Praxis beschrieben. Es wurde ein Überblick über die Herausforderung in der Modellierung eines komplexen Produktionssystem in der Stahlindustrie gegeben. Hierbei stellte insbesondere die Modellierung der optimierenden Verfahren eine Herausforderung dar. Anhand der Ergebnisse einer Fallstudie basierend auf einem Ausschnitt des Simulationsmodells konnte der Einfluss der Integration eines optimierenden Verfahrens dargestellt werden. Abschließend wurde ein Überblick über Arten der Integration optimierender Verfahren in Simulationsmodellen inklusiver der jeweiligen Vor- und Nachteile gegeben. Es konnten Empfehlungen gegeben werden, welche Art der Integration optimierender Verfahren im Rahmen einer IOS für Probleme aus der Praxis geeignet ist.

Literatur

- Borodin, V.; Bourtembourg, J.; Hanaien, F.; Labadie, N.: COTS software integration for simulation optimization coupling: case of ARENA and CPLEX products. *International Journal of Modelling and Simulation* 39 (2019) 3, S. 178–189.
- Dehghanimohammadabadi, M.; Keyser, M.: Tradeoffs between objective measures and execution speed in Iterative Optimization-based Simulation (IOS). In: Yilmaz, L. Chan, W., Moon, I.; Roeder, T.; Macal, C.; Rosetti, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, Huntington Beach (CA), 6.-9. Dezember 2015, S. 2848–2859.
- Fernandes, N.; Dehghanimohammadabadi, M.; Carmo Silva, S.: Iterative Optimization-Based Simulation: A Decision Support Tool for Job Release. In: Rocha, Á; Adele, H.; Paulo Reis L.; Costanzo, S. (Hrsg.): *Trends and Advances in Information Systems and Technologies*. Cham: Springer International 2018, S. 706–713.
- Figueira, G.; Almada-Lobo, B.: Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory* 46 (2014) 1, S. 118–134.
- Gutenschwager, K.: *Online-Dispositionsprobleme in der Lagerlogistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2002.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2017.
- Kapadia, M.; Starly, B.; Thomas, A.; Uzsoy, R.; Warsing, D.: Impact of Scheduling Policies on the Performance of an Additive Manufacturing Production System. *Procedia Manufacturing* 39 (2019) 1, S. 447–456
- Kulkarni, K.; Venkateswaran, J.: Iterative Simulation and Optimization approach for job shop scheduling. In: Tolk, A; Diallo, S.; Ryzhov, I.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC)*. Savannah (USA), 07.- 10. Dezember 2014, S. 1620–1631.
- März, L.; Krug, W; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.
- Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Optimierung*. Berlin: Beuth, 2020.
- Wichmann, M.: *Auftragsbasierte Belegungsplanung von Stranggießanlagen in der stahlerzeugenden Industrie*. Wiesbaden: Springer 2014.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

DISPO 4.0 – Simulationsbasierte Optimierung von Bestelllosgrößen

DISPO 4.0 – Simulation-based Optimization of Purchase Order Lot Sizes

Alexander Schmid, Alexander Granig, Thomas Sobottka, Martin Riestler, Wilfried Sihl, Fraunhofer Austria Research GmbH & TU Wien, Wien (Austria),
alexander.schmid@fraunhofer.at, thomas.sobottka@fraunhofer.at,
martin.riester@fraunhofer.at, wilfried.sihl@fraunhofer.at

Abstract: This paper presents the development and evaluation of a digital planning method for the operational purchasing that enables an automated and product-specific optimized material requirements planning. With materials planning today facing a volatile and complex market environment, the trend towards automated processes in procurement is the key to competitiveness. Although simulation-based optimization for one of the key tasks in material requirements planning, purchase order lot size planning, offers great potential, these digital tools are not yet readily available and thus not widely used in the industry. Thus, this paper develops a simulation-based optimization of purchase orders and evaluates the method in two case-studies in the capital good industry, using 15 purchase order lot sizing algorithms. The results point to a significant cost savings potential and provide insights into the comparative benefits of the algorithms.

1 Einführung und Motivation

Dieser Anwendungsbeitrag stellt die Weiterentwicklung eines digitalen Planungswerkzeugs (Schmid et al., 2021) für den operativen Einkauf vor, welches eine automatisierte produktspezifisch optimierte Materialdisposition ermöglicht. Dafür wird eine Optimierung auf Basis einer statischen Simulation als Bewertungsfunktion adaptiert und evaluiert. Bei der Weiterentwicklung fließen rollierende Prognosedaten in das Modell ein, die durch eine von den Autoren entwickelte digitale Planungsmethode (Schmid et al., 2022) generiert werden.

Im operativen Einkauf, bzw. in der Materialdisposition, existieren eine Vielzahl an Bestelllosgrößen-Algorithmen (siehe *Abbildung 1*), deren Anwendung mathematisches Know-how benötigt, welches in den Unternehmen jedoch zumeist fehlt (Lohmann, 2010). Zudem herrscht Intransparenz, welche Bestelllosgrößenverfahren es gibt und welche vielversprechend in der Anwendung

sind (Lohmann, 2010; Kemmner, 2021). Durch fehlendes Know-how in den Unternehmen werden Entscheidungen aus subjektiver Einschätzung getroffen, ohne eine datengestützte Basis bzw. ein Vorgehensmodell. Durch fehlendes Know-how in den Unternehmen werden Entscheidungen intuitiv getroffen, ohne eine datengestützte Basis bzw. ein Vorgehensmodell. Dadurch kommt es zu Intransparenz in der Entscheidungsfindung zur Bestellmengenrechnung in der verbrauchsgesteuerten Materialdisposition (Schmid et al., 2021; Meitinger, 2021). Durch die Anwendung von digitalen Planungstools in der Materialdisposition kann die Planung (teil)automatisiert werden (Kämpf et al., 2022). Zudem besteht großes Nutzungspotential bei der Verringerung von Fehlern, bei der Effizienzsteigerung im Prozess und bei Kosteneinsparungen (Kämpf et al., 2022). Eine Studie sieht das Einsparungspotential bei einem digitalisierten Einkauf bei bis zu 40% (Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ), 2021).

Die von den Autoren hierfür in vorhergehenden Publikationen entwickelte Planungsmethode für den operativen Einkauf, ermöglicht eine produktspezifisch optimierte Materialdisposition (Schmid et al., 2021). Dafür wurde eine Optimierung auf Basis einer statischen Simulation als Bewertungsfunktion entwickelt. Im vorliegenden Beitrag sind diese Erweiterungen enthalten:

- Methodenanwendung auf Basis von vergangenen Absatzprognosen, statt zum Planungszeitpunkt unbekanntem tatsächlichen Absatzmengen, für ein realitätsnäheres Ergebnis und Ausweis des Optimierungspotentials
- Berücksichtigung von Prognosen und Prognosefehlern auf die Wahl des Bestelllosgrößen-Verfahrens und auf die erzielten Wirkungsvorteile für Unternehmen; zusätzlich erfolgt die Auswertung eines weiteren Use-Cases
- Integration neuer Forschungserkenntnisse und damit Integration neuer weitsichtiger Bestelllosgrößenverfahren in die Methode

Der Rest des Papers ist wie folgt strukturiert: Im Abschnitt 2 wird relevante Literatur betrachtet, in Abschnitt 3 wird die Planungsmethode beleuchtet, in Abschnitt 4 die Fallstudienevaluierung präsentiert und im abschließenden Abschnitt 5 werden die Ergebnisse diskutiert und ein Forschungsausblick gegeben.

2 Erkenntnisse aus Literaturanalyse

In einer Literaturanalyse wurden bislang nicht berücksichtigte Bestelllosgrößenverfahren identifiziert und in die Übersicht (*Abbildung 1*) aufgenommen. Die blau markierten Verfahren werden in der hier vorgestellten Planungsmethode berücksichtigt und angewendet. Bei der Erweiterung des digitalen Planungswerkzeugs wurden zwei Bestelllosgrößenverfahren ergänzt, die gleichzeitig dynamisch und weitsichtig agieren können. Bei den Bestelllosgrößenverfahren können unsichere Planzahlen die Überlegenheit der theoretisch optimalen Lösungsverfahren (Bspw. *Wagner-Whitin* (Leinz et al., 1997)) in Frage stellen. Weitsichtige Verfahren versuchen Wechselhaftigkeit in der Bestellrechnung zu reduzieren, indem zukünftiger Bedarf und durchschnittlicher Bedarf über längere Zeiträume antizipiert bzw. mit berücksichtigt wird (Robrade, 1990). Aus diesem Grund wurden die zwei weitsichtig agierenden Verfahren in die Betrachtung und Bewertung in das digitale Planungswerkzeug ergänzend aufgenommen:

- Verfahren von *Leinz-Bossert-Habenicht* (Leinz et al., 1997)

- Algorithmus von *Silver/Miltenburg* (Silver und Miltenburg, 1984)

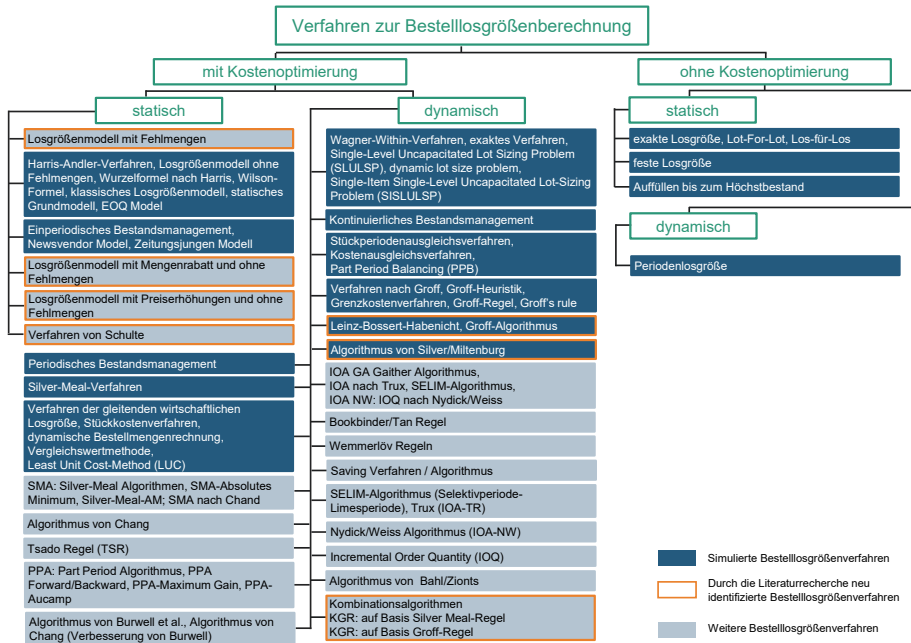


Abbildung 1: Übersicht Verfahren zur Bestelllosgrößenberechnung – eigene Darstellung als Ergebnis der Literaturanalyse (Schmid et al., 2021) ergänzt um: (Lasch, 2021; Schulte, 2001; Robrade, 1990; Leinz et al., 1997)

3 Planungsmethode

3.1 Bewertungsfunktion nach Total Landed Cost (TLC)

Zur Bewertung einer kostenoptimalen Bestellrechnung wurde eine TLC-Betrachtung herangezogen. Unter TLC wird die Summe der anfallenden Kosten während der Beschaffungsphase verstanden (Pumpe und Vallée, 2017). Um eine Bewertungsfunktion nach TLC durchführen zu können, war eine umfassende Erhebung an Kostendaten bei den Unternehmen erforderlich. Dazu wurden Daten zu Einkaufspreis, Transport-, Wareneingangs- und Buchhaltungskosten erfasst und berücksichtigt. Ebenfalls wurden die anschließenden Lager-, Kapitalbindungs- sowie Unterbestandskosten eines jeden Artikels bewertet und beachtet. Bei den Bestellkosten ist hierbei eine Unterscheidung zwischen bestellfixen und variablen Stückkosten vorzunehmen (Zapf et al., 2019). Folgende Bewertungsfunktion wurde in der entwickelten digitalen Planungsmethode angewendet.

$$\begin{aligned}
 \text{Kosten pro Periode} &= K * \text{Anzahl an Bestellungen} + h * \\
 &\text{Lagerbestand (bei Lagerbestand} > 0) + c_u + v * \text{Bestellmenge} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Die pro Bestellung anfallenden fixen Bestellkosten (K) sind:

$$K = \text{Wareneingangskosten} + \text{Interne Kosten pro Bestellung} + \text{Buchhaltungskosten pro Bestellung} + \text{Nebenkosten pro Bestellung} \quad (2)$$

Die Lager- und Kapitalkosten (h) sind:

$$h = (\text{Lagerkosten} + \text{Kapitalkosten}) * \text{Standardpreis pro Einheit} \quad (3)$$

Die variablen Bestellkosten fallen pro bestelltem Stück an (v = variable Stückkosten über Nebenkosten). Zuletzt gibt es noch die Unterbestandskosten, die anfallen, wenn ein Unterbestand besteht (c_u = Unterbestandskosten) und eine benötigte Warenverfügbarkeit nicht gegeben ist.

3.2 Bestellpunktverfahren als Basis der Planungsmethode

Grundlage der entwickelten digitalen Planungsmethode für die verbrauchsgesteuerte Materialdisposition der Investitionsgüterindustrie bildet das Bestellpunktverfahren. Bei Erreichen des Bestellpunkts wird eine zu definierende Bestellmenge bestellt. Der Bestellpunkt, oder auch Meldebestand genannt, deckt den Materialbedarf innerhalb der Wiederbeschaffungszeit ab. Dabei muss der Restbestand ausreichen, um die während der Wiederbeschaffungszeit eintreffende Nachfrage zu decken und auch ein Sicherheitsbestand für mögliche Unsicherheiten im Wiederbeschaffungsprozess kann als Bestandteil des Restbestandes definiert werden (Claus et al., 2021). Die Ermittlung der kostenoptimalen Bestellmengen erfolgt durch das digitale Planungswerkzeug mit den Bestelllosgrößenalgorithmen (siehe Abbildung 1). Bei der Bemessung der Bestellmenge werden in beiden Fallstudien keine Mindestlosgrößen bzw. mögliche Verpackungseinheiten berücksichtigt, da diese systemseitig nicht hinterlegt waren. Daher kann jeder Artikel in beliebigen Stückzahlen bestellt werden.

3.3 Die simulationsbasierte Planungsmethode

Die digitale Planungsmethode bewertet anhand einer historischen Betrachtung von 12 Monaten unter 15 Bestelllosgrößenverfahren das kostengünstigste Verfahren je Artikel und berechnet anhand prognosebasierter Bedarfe die kostenoptimalen zukünftigen Bestellmengen und Bestellzeitpunkte. Die Bestellrechnung der verbrauchsgesteuerten Materialdisposition wird somit (teil-)automatisiert und digitalisiert. Die Abbildung 2 stellt die Vorgehensweise bei der simulationsbasierten Optimierung dar.

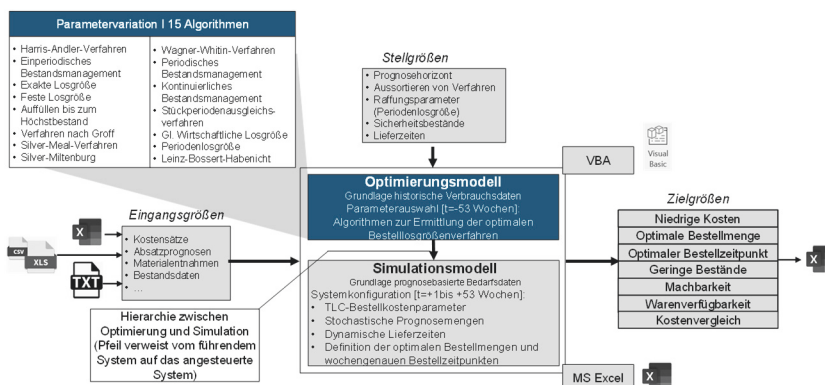


Abbildung 2: Methodenübersicht in Anlehnung an: (Schmid et al., 2021)

Die Eingangsgrößen für das Simulationsmodell sind Kostensätze, Absatzprognosen, Bedarfe und die Bestandsdaten. Die Stellgrößen sind Prognosehorizonte, Planlieferzeiten, Sicherheitsbestände und Raffungsparameter. Das digitale Planungswerkzeug wurde in MS-Excel mit der Programmiersprache VBA (*Visual Basic for Applications*) entwickelt. Die Zielvariablen, die in *Abbildung 2* zu sehen sind, sind niedrige Kosten, optimale Bestellmenge und -zeitpunkt, niedrige Bestände, Durchführbarkeit, Warenverfügbarkeit und der Vergleich der Kosten auf der Grundlage von Bedarfsprognosen. In der determinierten Simulation werden Materialzu- und -abgänge im Zeitverlauf erfasst. Für die zukünftigen Bedarfe wird mit Prognoseverfahren (Schmid et al., 2022) ein erwarteter Bedarf in der Zeitreihe erfasst. Die Planung wird rollierend monatlich ausgeführt.

4 Fallstudien-Evaluierung

4.1 Charakterisierung der Fallstudien

Die digitale Planungsmethode für eine kostenoptimierte Bestellrechnung wurde mit dispositionsrelevanten Daten der folgenden zwei Fallstudien von Unternehmen aus der Investitionsgüterindustrie evaluiert und validiert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Charakterisierung der Fallstudien

	Einheit	Unternehmen 1	Unternehmen 2
Branche	[-]	Herstellung von sonstigen Metallwaren a.n.g	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
MitarbeiterInnen	[Anzahl]	115	250
Umsatz	[€/a]	22,3 mio.	98 mio.
aktive LieferantInnen	[Anzahl]	1.780 (61 Länder)	1.258 (28 Länder)
Einkaufsvolumen	[€/a]	11,5 mio.	60 mio.
KundInnen	[Anzahl]	346 (51 Länder)	38.800 (22 Länder)
IT-System	[Type]	SAP	Infor M3
Artikel	[Anzahl]	~4.300 Produktionsartikel	~17.600 Ersatzteilartikel

Die wesentlichen Unterschiede (Zusammenfassung in Tabelle 2) in den beiden Fallstudien haben Auswirkungen auf die Ergebnisse der entwickelten digitalen Planungsmethode. In Fallstudie 1 werden die Bestände mit Eigenkapital finanziert, weshalb die Eigenkapitalrendite für die Bewertung der Kapitalbindung herangezogen wurde. In Fallstudie 2 werden die Lagerbestände fremdfinanziert, wodurch die Kapitalbindung mit dem Kreditzinssatz bewertet wurde. Betrachtet man die Art der Disposition, so sind für die betrachtete Kleinserienfertigung in Fallstudie 1 weniger unterschiedliche Artikel zu disponieren, die dafür in größeren Stückzahlen vorliegen. Im Gegensatz zur betrachteten Ersatzteildisposition von Fallstudie 2, wo eine Vielzahl an unterschiedlichen Artikeln in zumeist Klein- bzw. Kleinstmengen disponiert werden. Variable Nebenkosten (Transport-, Verpackungs-, Verzollungskosten etc.) zur Bestellung wurden in der Fallstudie 1 ausgewertet und berücksichtigt. In Fallstudie 2 werden die variablen Nebenkosten zumeist von LieferantInnen getragen, was sich auf den Stückpreis niederschlägt. In Fallstudie 2 werden die anfallenden variablen Nebenkosten weder auf die einzelnen Bestellungen referenziert, noch

systematisch dokumentiert, weshalb diese in der Kostenbetrachtung nicht berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 2: Wesentliche Unterschiede der beiden Fallstudien

Wesentlicher Unterschied	Fallstudie 1	Fallstudie 2
Kapitalbindung	Bewertet mit Eigenkapitalrendite 12%	Fremdfinanziert mit 3%
Art der Disposition	Kleinserienfertigungsdisposition	Ersatzteildisposition
Variable Nebenkosten	Nachbelege aus dem ERP-System wurden ausgewertet und berücksichtigt	Nebenkosten werden systemseitig nicht dokumentiert/erfasst und somit nicht berücksichtigt
Unterbestandskosten	Produktgruppenspezifisch	Artikelspezifisch
Wareneingangskosten	Wareneingangsprüfung wird im Unternehmen durchgeführt	Wareneingangsprüfung ausgelagert und wird nicht bewertet
Planlieferzeit	Wochentage (1Periode = 7 Tage)	Arbeitstage (1Periode = 5 Tage)

Unterbestandskosten werden in Fallstudie 1 aufgrund der Kleinserienfertigung auf das fertige Produkt bezogen. Fehlt eine Komponente, die für die Fertigung eines Produktes benötigt wird, kann das gesamte Produkt nicht termingerecht gefertigt und ausgeliefert/verkauft werden. In der Ersatzteildisposition in Fallstudie 2 wird jeder Artikel eigens betrachtet. Möchte ein Kunde/ eine Kundin ein Ersatzteil, welches aber aufgrund einer möglichen Bestandsunterdeckung nicht verfügbar ist, so wird das Produkt zumeist über eine/n konkurrierende/n Ersatzteilhändler/in bezogen und der Umsatz ist verloren. Daher ist speziell in der Ersatzteildisposition die Warenverfügbarkeit ein wesentliches Erfolgskriterium. In Fallstudie 1 wird zwischen prüfpflichtigen und nicht prüfpflichtigen Artikeln im Wareneingang unterschieden. Die prüfpflichtigen Artikel unterliegen mehr oder weniger aufwändigen Prüfverfahren, deren Aufwände in den Kosten abgebildet werden. In der Fallstudie 2 ist die Wareneingangsprüfung an den/ die LieferantIn ausgelagert, der/ die im Rahmen einer Wareneingangsprüfung die notwendigen Prüfungen durchführt und dokumentiert. Diese Kosten werden zumeist auf den Teilepreis aufgerechnet, weshalb in Fallstudie 2 keine Wareneingangskosten berücksichtigt werden. Die Warenannahme verbirgt sich in den internen Prozesskosten des Lagers und wird in Fallstudie 2 in den Lagerkosten berücksichtigt.

4.2 Evaluierung der Methode in Fallstudien

Die Ergebnisse der zwei Fallstudien in der Investitionsgüterindustrie zeigen folgendes Bild: Mit einer Datenbasis von 4.329 | 17.608 Artikeln konnten für 818 | 1.501 optimierbare Artikel Kosteneinsparungen von 36% | 52 % erreicht werden. Für Artikel ohne ausreichende Datenbasis, bzw. ohne zukünftige Bestellbedarfe, konnte in der Fallstudie keine simulationsbasierte Optimierung durchgeführt werden. In den beiden Fallstudien lassen sich durch die Planungsmethode im Zeitraum Sept. 2021-Aug. 2022 (Fallstudie 1) von Ist-Bestellkosten von 754.876 € auf 482.868 € bzw. im Zeitraum Apr. 2021-Mrz. 2022 (Fallstudie 2) die Ist-Bestellkosten von 386.054 € auf 183.861 € reduzieren. In der Arbeit wird zusätzlich die Auswirkung des Prognosefehlers auf die Wahl des optimalen Verfahrens betrachtet, sowie die Wirkung der zwei neu in die Methode integrierten Verfahren ausgewertet.

Die Tabelle 3 zeigt die von der Planungsmethode als optimal gewählten Verfahren.

Tabelle 3: Prozentuelle Verteilung der Bestelllosgrößenverfahren je Fallstudie (F)

Bestelllosgrößenverfahren	F1	F2	Bestelllosgrößenverfahren	F1	F2
Wagner-Within-Verfahren	75,6%	67,3%	Periodenlosgröße	0,5%	0,1%
Harris-Andler Verfahren	5,4%	10,2%	Verfahren von Groff	0,0%	0,1%
Kontinuierl. Bestandsmanagement	0,0%	9,0%	Auffüllen bis zum Höchstbestand	1,2%	0,0%
Feste Losgröße	2,7%	5,9%	Silver-Meal-Regel	0,1%	0,0%
Periodisches Bestandsmanagement	5,6%	5,4%	Einperiod. Bestandsmanagement	0,0%	0,0%
Leinz-Bossert-Habe nicht	1,0%	1,4%	Gleitende wirtschaftliche Losgröße	0,0%	0,0%
Stückperiodenausgleichsverfahren	0,4%	0,6%	Algorithmus von Silver/Miltenburg	0,0%	0,0%
Exakte Losgröße	7,6%	0,1%			

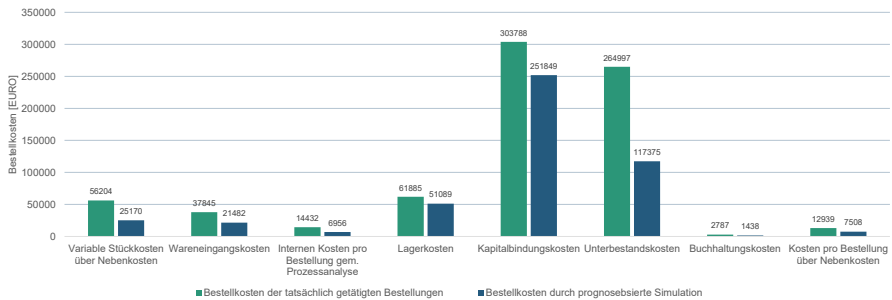


Abbildung 3: Kostenergebnisse der optimierbaren Artikel Fallstudie 1

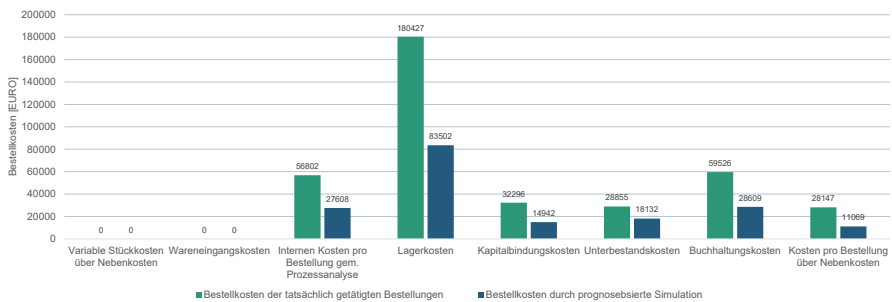


Abbildung 4: Kostenergebnisse der optimierbaren Artikel Fallstudie 2

Die angeführten Grafiken Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen einen direkten Vergleich der Kostenergebnisse beider Fallstudien. Dadurch werden die Unterschiede der in Kapitel 3.1 angeführten TLC sichtbar, sowie die Auswirkungen der in Tabelle 2 angeführten wesentlichen Unterschiede der beiden Fallstudien ersichtlich. Im Unternehmen der Fallstudie 1 werden die variablen Bestellkosten nicht auf eine Bestellung referenziert und auch nicht dokumentiert und erfasst. Diese werden zumeist von LieferantInnen getragen und in den Stückpreis mit einkalkuliert. Aus diesem Grund konnten diese Kosten in der TLC-Kostenbetrachtung der Fallstudie 2

nicht berücksichtigt werden. Die Wareneingangskosten werden in Fallstudie 2 ebenfalls nicht ausgewiesen, da die Wareneingangsprüfung an die LieferantInnen ausgelagert ist und die Kosten der Warenannahme nicht gesondert erfasst werden. Die Kosten der Warenannahme sind aufgrund der in Unternehmen 2 vorliegenden Kostenerfassung in den Lagerkosten integriert. Dies ist auch mit ein Grund für die großen Unterschiede in den Lagerkosten. In Fallstudie 2 konnten durch die Methodenanwendung die TLC aus der bisherigen Planung im Unternehmen von 386.054 € auf 183.861 € reduziert werden und wenn die Methode die zukünftigen Bedarfe nicht nur prognostizieren, sondern kennen würde, wäre eine weitere Reduktion auf 167.535 € möglich. Letzteres kann als weiteres Optimierungspotential durch eine Verbesserung der Prognosequalität angesehen werden.

Bei der Analyse der Auswirkung des Prognosefehlers auf die Wahl des bestgeeigneten Verfahrens für die Artikel konnte kein klarer Zusammenhang erkannt werden. Abbildung 5 stellt die Zuordnung der Prognosefehlerverteilung der dem jeweilig bestgeeigneten Verfahren gegenüber.

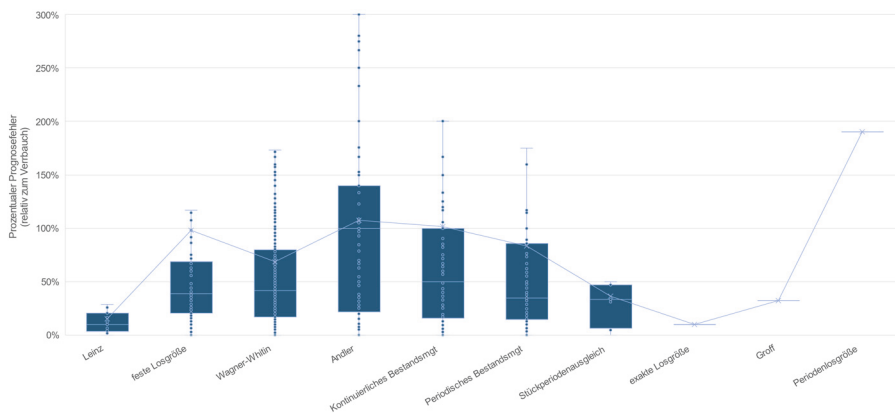


Abbildung 5: Box-Plot der Prognosefehlerverteilung (Ausreißer nicht dargestellt)

Zwar sind Unterschiede in den Verteilungen erkennbar, allerdings können die Autoren keinen, ursprünglich erwarteten, Zusammenhang zwischen eher groben Verfahren, wie der festen Losgröße, zu hohen Prognosefehlern und umgekehrt exakten Verfahren, wie *Wagner-Within*, zu kleinen Prognosefehlern erkennen.

5 Diskussion & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die realitätsnahe Anpassung des Modells, sich die Komplexität und der Rechenaufwand, sowie auch die Anforderungen an die Qualität der Inputdaten, erhöht haben. Das Einsparungspotential in der Fallstudie 1 unter der Annahme exakter Prognosen bzw. Nicht-Betrachten des Prognosefehlers, aus der vorigen Publikation, wurde auf 36% Optimierung zur Ist-Planung reduziert, was aber immer noch ein hohes Nutzenpotential bei kostenoptimaler Anwendung von Bestelllosgrößenverfahren darstellt. Das erstmalig erfasste Einsparungspotential im Rahmen der Fallstudie 2 am Beispiel der Ersatzteildisposition ergibt eine Reduktion der Kosten um 52 %. Dies zeigt auch auf, dass die digitale Planungsmethode bei

unterschiedlichen Anwendungsfällen in der verbrauchsgesteuerten Materialdisposition in der Investitionsgüterindustrie anwendbar ist.

Das Erweitern der Planungslogik um die zwei weitsichtigen Bestelllosgrößenverfahren von *Leinz-Bossert-Habenicht* und von *Silver/Miltenburg* brachte keine relevante Verbesserung. Der Algorithmus von *Silver/Miltenburg* wurde in keinem der Fallbeispiele und das Verfahren von *Leinz-Bossert-Habenicht* in Fallstudie 1 in 1 % und in Fallstudie 2 in 1,4 % der Fälle als kostenoptimaler Bestelllosgrößenalgorithmus gewählt. Jedoch konnte die in der Literatur vorherrschende Position bestätigt werden, dass das exakte Bestelllosgrößenverfahren von *Wagner-Within* unter Berücksichtigung des Kostenoptimums das dominierende Verfahren (Fallstudie 1: 75,6 % | Fallstudie 2: 67,3 %) ist (siehe Tabelle 3). Da kein klarer Zusammenhang von Prognosefehler und Wahl des Losgrößenverfahrens in den Datensätzen ermittelt werden konnte, ist eine mögliche Interpretation, dass die Wahl des Verfahrens weniger relevant gegenüber einer konsequenten Anwendung eines systematischen Verfahrens sein könnte. Zusätzlich könnte es auf die größere Bedeutung der Wahl der Melde- und Sicherheitsbestands-Niveaus hindeuten. Der als Kostenbewertungsfunktion gewählte TLC-Ansatz macht zudem die Unterschiede in den Kostenstrukturen einer Bestellung in den Unternehmen deutlich, die wesentlichen Einfluss auf die Wahl des kostenoptimalen Bestelllosgrößenverfahrens haben.

Die entwickelte Planungsmethode berücksichtigt neben einer prozessorientierten Kostenbetrachtung auch den Bestellpunkt bzw. Meldebestand, den Sicherheitsbestand und die Lieferzeit als wesentliche Faktoren für eine kosteneffiziente Bestelllosgrößenplanung. In der Praxis liegen jedoch oft keine aktuellen und detaillierten TLC-Kosten vor, die Sicherheitsbestände werden nur bei Bedarf und nach Erfahrung festgelegt und die realen Lieferzeiten entsprechen nicht den in den ERP-Systemen hinterlegten Werten. Um ein Kostenoptimum bei den Bestelllosgrößen zu erreichen, sollten daher dynamische Prozesse implementiert werden, die eine kontinuierliche Anpassung der TLC-Kosten, der Sicherheitsbestände und der Lieferzeiten ermöglichen. Dies wurde in dieser Arbeit exemplarisch gezeigt.

Der hier vorgestellte Planungsansatz auf Grundlage einer simulationsbasierten Optimierung vermag es zwar nicht, den operativen Bestellprozess vollständig zu automatisieren, jedoch kann diese Planungsmethode, dort wo die Datengrundlage in ausreichender Qualität vorliegt, die Materialdisposition (teil-)automatisieren. Dadurch lässt sich Aufwand im Bestellprozess reduzieren, Entlastung bei Standardabläufen in der Materialdisposition erzielen, die Kosteneffizienz in der Bestellabwicklung steigern und ein Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens beisteuern. In der weiteren Forschungsarbeit soll vor allem eine Zusammenführung der Methodenbestandteile der Materialdisposition zu einem integrierten optimierenden Verfahren entwickelt werden.

Danksagung

Diese Forschung wurde von der *Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft* (FFG), Fördernummer 872887, finanziert. Die Autoren danken allen FallstudienpartnerInnen für ihren Beitrag.

Literatur

- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung, 2. Auflage, Dresden, Regensburg, Duisburg: Springer Gabler 2021.
- Deutsche Verkehrs-Zeitung: Welche Effekte ein digitalisierter Einkauf bringen kann, 18.11.2021 verfügbar unter www.dvz.de/rubriken/detail/news/welche-effekte-ein-digitalisierter-einkauf-bringen-kann.html, geprüft: 10.11.2023.
- Kämpf, R.; Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik: Einkaufsbarometer Mittelstand 2022: Nachhaltige Beschaffung und Lieferketten. Hg. v. Onventis GmbH, Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik (BME) Stuttgart, 2022.
- Kemmner, G.-A.: Möglichkeiten und Grenzen der Losgrößenoptimierung: Mit Formeln aus der Theorie zum Kostenoptimum in der Praxis?, Herzogenrath: Abels & Kemmner, 2021: verfügbar unter www.ak-online.de/de/2021/06/optimallosgroesse-und-wirtschaftliche-losgroessenverfahren, geprüft: 10.07.2023.
- Lasch, R.: Strategisches Strategisches und operatives Logistikmanagement: Beschaffung, 3. Auflage, Wiesbaden; Springer Gabler, 2021.
- Leinz, J.; Bossert B.; Habenicht, W.: Entwicklung eines Verfahrens zur dynamischen einstufigen Einprodukt-Bestellmengenplanung: Arbeitspapiere der Universität Stuttgart-Hohenheim, Lehrstuhl für Industriebetriebslehre - Prof. Dr. W. Habenicht. 2. Auflage, Stuttgart-Hohenheim: Universität Stuttgart-Hohenheim, 1997.
- Lohmann, R.: Erfolgsfaktor Integration, Die Produktionsplanung im Zusammenhang betrachtet, in: HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik, dpunkt Verlag, Heft 272, 2010, S. 60-70.
- Meitinger, T.: SCRM-Strategien: Störungen in der Lieferkette vermeiden. HUSS-VERLAG GmbH 2021. verfügbar unter logistik-heute.de/news/scrm-strategien-stoerungen-der-lieferkette-vermeiden-34209.html, geprüft: 10.07.2023.
- Pumpe, A.; Vallée, F.: A typology for selecting an appropriate Total Landed Cost method in international supplier selection decisions, in: ScienceDirect, Transportation Research Procedia, 25, 2017, S. 853-869.
- Robrade, A.D.: Dynamische Einprodukt-Lagerhaltungsmodelle bei periodischer Bestandsüberwachung. Heidelberg: Physica-Verlag 1990.
- Schmid, A.; Kamhuber, F.; Sobottka, T.; Sihm, W.: Simulationsgestützte Absatzprognoseoptimierung in der Investitionsgüterindustrie. in: Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge. Wien: ARGESIM Verlag 2022, S. 73–80.
- Schmid, A.; Sobottka, T.; Lielacher, M.; Sihm, W.: Simulationsbasierte Optimierung von Bestelllosgrößen in der verbrauchsgesteuerten Materialdisposition der Investitionsgüterindustrie. in: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2021. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 475–484.
- Schulte, G.: Material- und Logistikmanagement. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag 2001.
- Silver, E.; Miltenburg, J.: Two Modifications Of The Silver-Meal Lot Sizing Heuristic. in: INFOR: Information Systems and Operational Research 22 (1) 1984, S. 56–69.
- Zapf, M.; Pengg, H.; Bütler, T.; Bach, C.; Weindl, C.: Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Cross-Domain Simulation based on BPMN and the Process-Driven Approach

Domänenübergreifende Simulation basierend auf BPMN und dem Prozessgesteuerten Ansatz

Marvin Schobert, Pooria Lahooti, Jörg Franke, Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS), Erlangen (Germany), marvin.schobert@faps.fau.de, pooria.lahooti@fau.de, joerg.franke@faps.fau.de

Abstract: Simulation tools are currently facing two significant challenges: On the one hand, common applications are often focussed on a specific domain, which leads to a high synchronisation and integration effort in the investigation of cross-domain issues. On the other hand, the transition from simulated models to operations monitoring and continuous improvement requires a high further development effort or even a completely new implementation with other technologies. This paper aims to present a novel one-size-fits-all approach based on the Business Process Model and Notation (BPMN) standard and the Process-Driven Approach (PDA) for creating and executing process models for discrete event simulation. It combines the BPMN's potential to graphically represent any processes in arbitrary precision with those of PDA to sustainably integrate services, databases and tools via low-code. By means of two exemplary case studies, we would like to illustrate its practical implementation and potentials and challenge the scientific discourse.

1 Introduction, Motivation and Structure

Against the background of increasing complexity of variants and supply chains, rising global competitive pressure and continuous technological progress, interactions between different functional and technical business areas are intensifying. Simulation tools are currently facing two significant challenges in this respect: On the one hand, common applications are often focussed on a specific domain, such as kinematics, material flow or process technology and a specific discipline like production or business processes, which leads to a high synchronisation and integration effort in the investigation of cross-domain issues. The complexity and sophistication of each individual tool requires expert and application knowledge, potentially strengthening domain-based silo thinking. On the other hand, evolving from simulated models to operations monitoring and continuous improvement requires high further efforts or even a new set up with different technologies. (Yu and Zheng, 2021)

Consequently, research is still needed to enable a deeper integration of discrete event simulation (DES) within crossing domains as well as the operations of production and logistics systems, while lowering its implementation efforts. This paper aims to present a novel one-size-fits-all approach based on the Business Process Model and Notation (BPMN) standard (OMG, 2013) and the Process-Driven Approach (PDA) (Stiehl, 2014) for creating and executing DES experiments. Hereby, we expect three main advantages: (1.) Cross-domain investigation gets simplified and can be done by asset managers (or citizen developers) instead of system experts only, (2.) the comprehensive and precise language of BPMN as a *lingua franca* enables overarching processes of any domain in any level of detail and (3.) lastly the PDA reduces change efforts by applying state of the art distributed software and low-code concepts to the field of simulation. Our paper will be structured as follows: First, relevant basics about BPMN, the PDA and microservice architecture will be briefly explained. Afterwards, state of the art and how this paper fits in will be discussed. The main part forms the introduction and explanation of our concept, as well as following its illustration by the practical implementation and discussion of two differently characteristic use cases. Finally, future efforts and further questions are addressed in a conclusion and outlook.

2 Relevant Basics and State of the Art

VDI 3633 Part 1 (2014) defines the term of *simulation* as the “representation of a system with its dynamic processes in an experimentable model to reach findings which are transferable to reality; in particular, the processes are developed over time”. In a deeper dive, two terms have greater significance: *Model* (“Simplified reproduction of a planned or existing system with its processes in a different conceptual or concrete system”) and *Process* (“Full set of interacting operations in a system through which material, energy or information are processed, transported or stored”). Due to the large number of time-dependent and random system variables and the highly networked interactions, mathematical-analytical methods quickly reach their limits when investigating such systems. Simulation, on the other hand, can be used to examine the temporal behaviour of complex technical systems. (VDI, 2014)

Typically, common simulation tools are good in investigating the interactions of technical systems within a single domain (e. g. Tecnomatix Plant Simulation for material flow analysis, NX MCD for kinematics simulation or Matlab for physics simulation). For questions involving multiple domains (like “How does a change request within the bill of material affect the return on invest of certain equipment?”), iterative adaption effort and the combined use of multiple distributed systems is incurred. To express the relations within a system containing multiple models, involved assets can be structured accordingly to VDI 3682 (2015): Products, energies or information (inputs) are converted to new products, energies or information (outputs) by a process operator, which is executed by a technical resource. More common, the generalized *product*, *process* and *resource* (also shortly known as PPR-model) approach is being used (Schleipen et al., 2015), which will also be referred to within this publication. For machine-executable simulation, it is important to consider the transfer of those principles to distributed software architecture (see Figure 1). Products and information objects can be resembled by stateful business objects, containing descriptive variables. Processes consist of chained activities (or method operations), which perform basic *create*, *read*, *update* or *delete* (CRUD) operations

on the business objects. In terms of (business) process management, activities are executed through human input or by dedicated IT-services, representing resources like e. g. humans, organisations, machines or robots (Freund and Rucker, 2019).

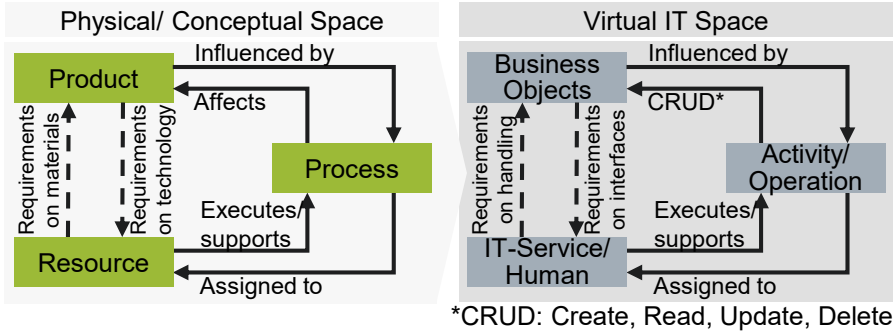


Figure 1: PPR-model within IT-context (left: based on VDI 3682)

Since processes’ activities represent the connecting units and are mainly dominated by domain experts, a process definition language should be intuitive, standardized, complete, precise and have the capability to be quickly transferred into executable software. The Business Process Model and Notation (BPMN), (OMG, 2013) makes it possible to modularise complex behavioural models and break them down into its elementary activities, conditions, transitions and events. Unlike other process notations such as the event-driven process chain, BPMN is standardised, offers a comprehensive palette for the precise graphical description of processes and enables the direct execution of the models in a process engine (Freund and Rucker, 2019). This orchestrates, monitors, integrates, reports and manages all tasks (see Figure 2).

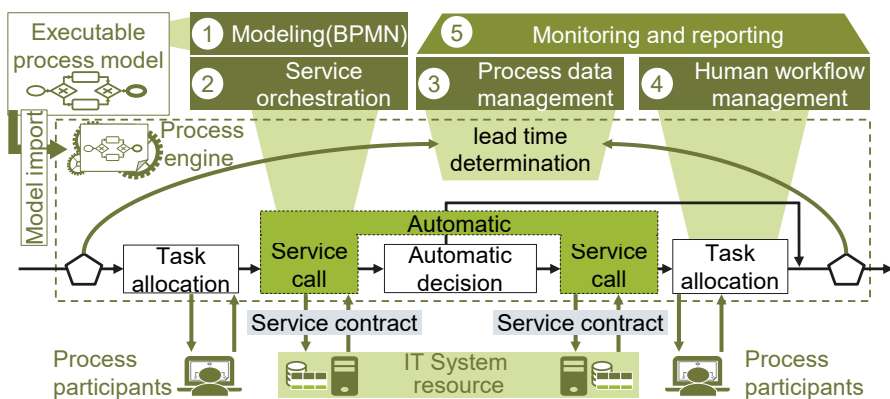


Figure 2: Features and Functionalities of a Process Engine (Schäffer et al., 2021b)

From a formal point of view, not only business relationships can be mapped in any abstraction, but also technical processes according to VDI 3682. The Process-Driven Approach (PDA) suggests an architecture, where process logic is executed within a

process engine and external services can be accessed using a predefined service contract describing its interface structure via asynchronous messaging (Stiehl, 2014). As long as both interfaces stay with the exchange format defined by the service contract (variables in e. g. JSON or XML), the IT-systems can be developed, maintained, exchanged and executed independently from business logic. In the context of business process modelling, events represent transaction incidents causing the development of a process, like customer and production orders, change requests, timers or task acknowledgements. Within DES, events are more generally defined by VDI 3633 as an “atomic incident that causes a transformation of state [...]”.

Various case studies have proven the operational use of BPMN in structured, organisational contexts like customer relationship management or request processing (Vom Brocke, J. et al. 2021). A previous publication involving the main author introduced an architecture and development method for process-driven web platforms within engineering, connecting users, systems and knowledge with operational planning processes (Schäffer et al., 2021a). In terms of asset lifecycle, those considerations exclusively map to operations, but will be adapted towards phase-independency within this paper. The idea of using BPMN for simulation generally exists in practice already: Some providers of workflow management systems (e.g. SAP Signavio, Trisotech) advertise functionalities for DES of BPMN process models in their portfolio. However, this simulation of process models is limited to the process engine’s system context for validation and optimization. Due to the missing integration of stateful systems, only the process itself can be simulated without being able to consider the interaction with stateful assets like products or resources.

Comparable research is mostly assigned to business informatics and deals with the mapping and analysis of business processes, BPMN-driven software architectures for Industry 4.0 and extensions for dedicated application areas. Steindl and Kastner propose and demonstrate a service framework architecture aligned to the RAMI4.0 IT layers with a message-oriented middleware concept similar to ours (see chapter 3) (Steindl and Kastner, 2021; DIN, 2016). The discrete event simulation capability of BPMN has generally been proven by Guizzardi et al. (2011). The publications that deal with simulation either do not explicitly consider assets like products or resources, do not involve networked systems and therefore enable limited findings, or focus on organisational processes only. Some of the research papers worth mentioning will be briefly presented: Dorrer (2020) suggests a solution to forecast parameters like duration, labor intensity, material consumption and costs by translating a BPMN model describing a manufacturing process to an equivalent, parametrized graphical evaluation and review technique-(GERT)-model, a probabilistic model for discrete-event systems. Vlasov and Gonoshilov (2019) simulate electronics manufacturing systems with the use of BPMN without explicitly considering products or resources and staying within process engine’s system as well. The diagrams show interactions between the different pools, but are not capable of doing further investigations. Durán et al. (2021) propose an extension to BPMN allowing to annotate models with resource, probability and duration information separately for the process execution, which enables automated parameter optimization. Ougaabal et al. (2019) distinguish process and resource types at different domains (IT, human/ organisation and physical means) and levels of abstraction (Business system, technology independent and technology specific models) in BPMN workflows during the simulation phase by using an extension enabling the consideration of resources. Respecting those

publications, the simultaneous consideration of processes along with products and resources has not yet been considered satisfactorily. In contrast to some of these approaches, we do not want to modify the established BPMN standard. Given that BPMN itself is not intended as a modelling tool for technical systems or resource management, we think it makes sense to keep process logic separated from asset persistence and therefore see BPMN as more of an orchestrator of sub-processes, activities and other systems.

3 Concept Introduction

The concept is described below using the three axes of application control, asset lifecycle and domain (see Figure 3). The general structure and architecture are influenced by the PDA (Schäffer et al., 2021b) and RAMI4.0 (DIN, 2016). While application control describes the technical architecture, the asset lifecycle point of view contains the use of external systems depending on its state. The domain dimension represents a specific view on the asset. The novelty is created by separating the executed logic (BPMN within a process engine), transaction data (events and protocols) and asset handling (back-end-services, databases and control interfaces).

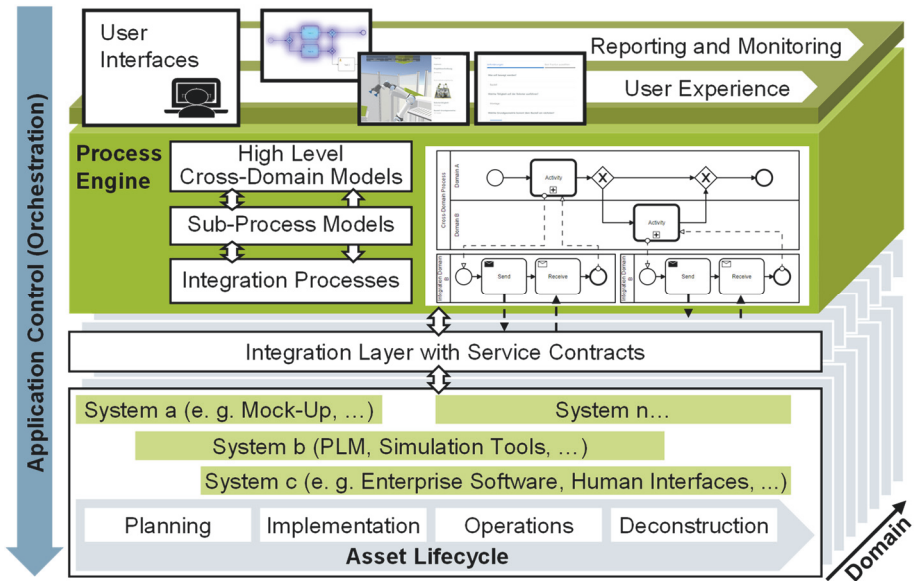


Figure 3: Concept composition of Process-Driven Cross-Domain Simulation

3.1 Application Control (Y-Axis):

The technical set up of a process-driven application in the context of simulation can be described following along the axis of application control, inspired by Stiehl (2014) and Schäffer et al. (2021b). It builds upon the concepts of distributed software architecture, execution logic expressed through BPMN and (micro-)service orchestration. The application is to be controlled and monitored via user interfaces containing especially dashboards and possibly user forms, if user tasks are to be

completed selectively through dedicated front ends within the simulation. The core process layer contains the cross-domain and -departmental BPMN models, which are to be modelled according to the style guide proposed by Silver and Fischli (2012). It is intended that a process model only displays the logic that is necessary at the corresponding level of abstraction and the more detailed description is outsourced to sub-processes. An integration layer should be used to connect independent, stateful systems to the process models by the use of service contracts. The process engine coordinates all transactions between participating systems, thereby achieving increased transparency, maintainability and scalability. By doing so, connected systems can be exchanged throughout the applications lifecycle without the need to change execution logic. The services for activity execution are to be connected through asynchronous messaging with events for loose coupling. Events get instantiated by the activities defined within the process models and cause CRUD-operations on the asset's states. Those can be stored in databases or systems (e. g. inventory), dedicated simulation tools (e. g. plants and cells) or physical environment.

3.2 Asset Lifecycle (X-Axis):

Since task execution is separated from process definition, process and data models don't need to be changed throughout the asset's lifecycles. Given the PDA's orchestration architecture, traditional choreography having many mutual interconnections between corresponding systems can be avoided (see Figure 4). Multiple assets with different lifecycle states each can be handled as well by the same executable process model. The degree of autonomy of the simulation can be flexibly adjusted: *Automatic Service Tasks* for system interaction, *Send* and *Receive Event Tasks* in combination with asynchronous communication for resource allocation and *User Tasks* for desired user interaction during simulation.

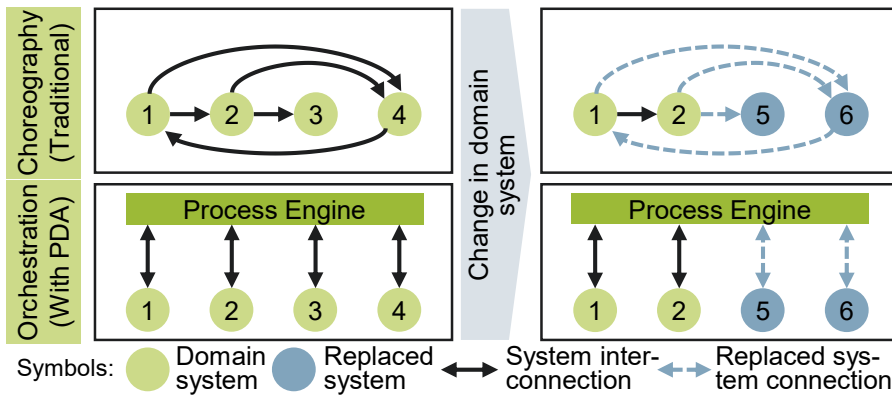


Figure 4: Interconnection between domain components

3.3 Domain (Z-Axis):

The concept of cross-domain involves the segmentation of interconnected systems, whereby each system is solely linked to the process engine (see Figure 4). Different domains can be various technical fields like mechanics, electrics and fluid dynamics as well as different business areas like production, purchasing or planning. Similar to

the lifecycle point of view, the approach benefits from a process engine that remains constant regardless of whether we are in a simulation or operational phase and have changes in domain systems. If, for example, two systems undergo changes during their lifecycles, only the interconnections between the modified systems and the process engine need to be slightly adjusted, while keeping remaining systems unchanged. As a result, this new approach shows efficiency for systems with numerous interconnections, offering the advantage of reduced complexity.

4 Exemplary Case Studies

The following will briefly describe the two case studies that were examined as part of the research. The first one (a)) resembles an exemplary, abstracted order fulfilment (also known as order to cash) process as commonly executed within small and medium sized enterprises while simulating knowledge worker tasks as well as inventory and finances development. The second case study (b)) considers a material flow simulation scenario with separation of process control, production task execution and product handling. Figure 5 shows the composition of each case study. The light green fields represent the business and technical process models, while dark green depict databases and back-ended systems. In scenario a), task execution (dark grey fields) is simulated by a stateful node.js-server, whereas in scenario b) a stateful Unity material flow simulation application is responsible for task execution. For ease of readability, the different domains are explicitly modelled in one dimension deviating from the concept’s representation in Figure 3 and one only time section is shown.

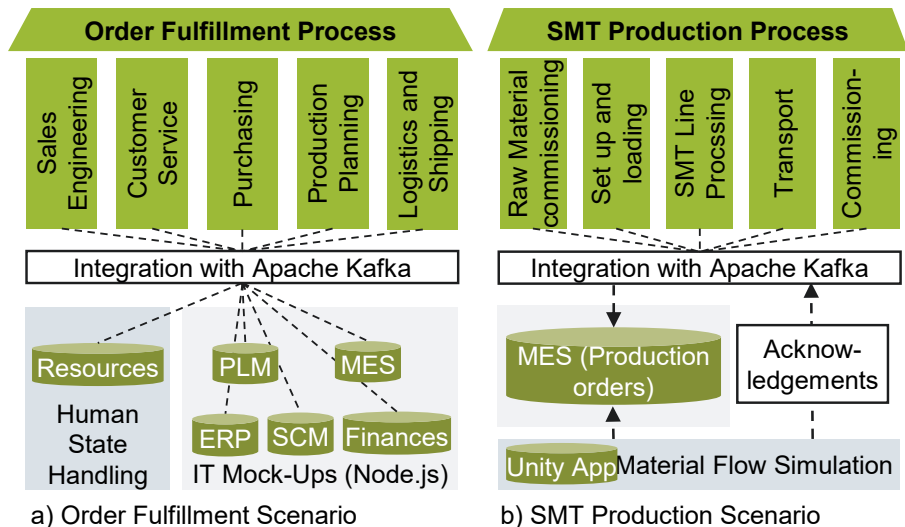


Figure 5: Technical composition of the two case study scenarios

4.1 Order Fulfilment Process

In case study one, an abstracted SME-inspired order fulfilment process was modelled in order to present the cross-domain idea, including the areas of sales, purchasing, customer service, production planning, production operations, logistics and finances.

A process instance is started by the arrival of an incoming order message coming from a simulation server via Apache Kafka. Thereby, any statistical custom order models can be fed into the system. Throughout the process, mock-up ERP, PLM and financial systems were integrated and all tasks to be performed by humans were carried out by a stateful resource-simulation-webservice bases on node.js. As a result, all process variants with their time and cost values as well as the utilisation of the individual resources can be traced over the entire order processing. The large amount of generated data (activity-, process-, business object- and transaction-data) makes each transaction traceable and provides information about occurring bottlenecks. As shown in Figure 6, the critical path and bottlenecks can easily be identified with the use of a heat map and resulting data. In the fictional scenario presented, the purchasing department is the main bottleneck, since most of the bill of materials products were purchased parts and no process automation took place. The rather low utilization rate is due to the time needed to process the events, which was not eliminated here and thus distorts the statistics. With increasing model accuracy, the replacement of simulated tasks with user tasks providing a dedicated front-end was successfully tested showing challenges in synchronizing simulation time.

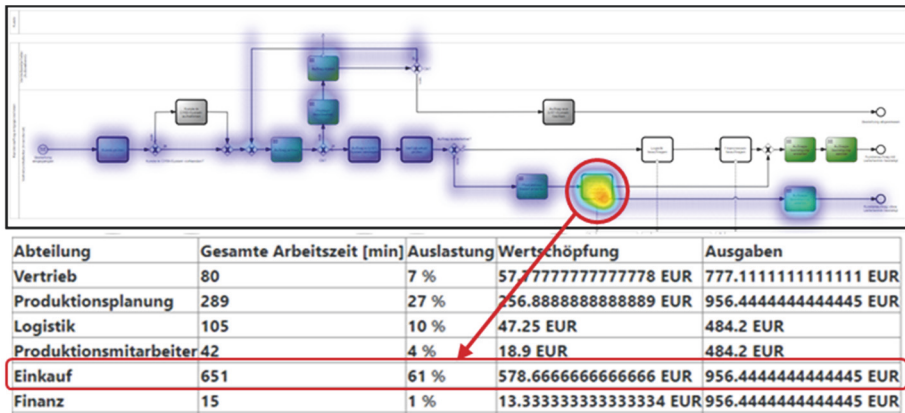


Figure 6: Critical path identification with heatmap (top) and values (bottom)

4.2 Combined Material Flow Simulation

The second case study aims to examine co-simulation potentials by integrating an outsourced material flow simulation into the process. For this purpose, the production process of a Surface Mount Technology (SMT) line of electronics production was modelled with BPMN, which accordingly writes orders into a MES. The material flow simulation tool (implemented with the game engine Unity for visualisation and web deployment purposes) queries orders from the MES via a TCP service and sends a completion notification event to the process engine once finished. Figure 7 shows the total production task list as also stored within the MES, the front-end of the web-based material flow system as well as the currently inspected process activity. Using this, the concept’s general capability to function as an orchestrator for distributed simulation has been successfully proved. Simultaneously, different kinds of process logic (e. g. business, knowledge work, kinematic, integration, physical) show potential to be modelled in BPMN and executed in various custom systems.



Figure 7: Production task list, current task and dedicated simulation environment

5 Conclusion and Outlook

In order to face current challenges concerning cross-domain simulation as well as combined cross-lifecycle investigation and operation, this paper presents a concept based on the BPMN standard and the Process-Driven Approach (PDA) for the creation and execution of tailored individual solutions making use of DES. It combines the BPMN's potential to graphically represent any processes in arbitrary precision with those of PDA to sustainably integrate external services, databases and tools into the process via low-code modules. In more detail, cross-domain process models are created in various degrees of abstraction with BPMN and compiled as well as executed within a process engine. By separating business logic from systems integration processes making the use of subprocesses and event stream processing, external subsystems specialised in certain domains can be orchestrated and exchanged throughout the applications lifecycle as needed without having to change the logic. This enables Citizen Developers and Process Owners, as people with a lot of domain expertise but potentially little IT knowledge, to map their cross-domain workflows in a tailored way and divide the details among the appropriate experts. Within this paper, two case studies are presented: One deals with the order fulfilment process across multiple departments and IT-systems, the other one regards distributed material flow simulation by outsourcing product handling in an external simulation system. While the general functionality, user-friendliness and high expressiveness of applications created with this approach have been demonstrated, long-term studies and systematic comparisons and integration with common languages, such as STEP AP242, FMI or AutomationML for co-simulation still need to be performed. Future research conducted by the main author will feature two different aspects among others: The simulation and operational execution of flexible processes (e. g. engineering projects), which have partially unpredictable agile phases, will be considered. For this purpose, the mapping of state machines using the Case Management Model and Notation (CMMN) standard as a flexible variant of BPMN is considered. Furthermore, the interaction between process data, business objects, transaction data and state data will be researched. For this purpose, one approach pursues the creation of a knowledge graph, which is fed with correlations and transactions via the process engine and can be created by DES at early planning stages already. The research occurs within the project "PDA-RobE", receiving funding by the VDI/VDE.

References

- Deutsches Institut für Normung e. V.: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0): DIN, 2016.
- Dorrer, M.G.: The digital twin of the business process model. *Journal of Physics: Conference Series* 1679 (2020) 3, 32096 (without page numbers).
- Durán, F.; Rocha, C.; Salaün, G.: Resource provisioning strategies for BPMN processes: Specification and analysis using Maude. *Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming* 123 (2021), 100711 (without page numbers).
- Freund, J.; Rücker, B.: *Real-Life BPMN: Using BPMN and DMN to analyze, improve, and automate processes in your company*. Berlin: Camunda 2019.
- Guizzardi, G.; Wagner, G.: Can BPMN Be Used for Making Simulation Models? In: Barjis, J. (Hrsg.): *Enterprise and Organizational Modeling and Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, pp. 100–115.
- Object Management Group: ISO/IEC 19510: Information technology - Business Process Model and Notation (BPMN): OMG, 2013.
- Ougaabal, K.; Ducq, Y.; Zacharewicz, G.; Tazi, S.: Distinguishing Resource type in Bpmn Workflows at Simulation Phase. In: *2019 Spring Simulation Conference (SpringSim)*, Tucson, AZ, USA, 29.04.2019 - 02.05.2019, 2019, pp. 1–12.
- Schäffer, E.; Schobert, M.; Reichenstein, T.; Selmaier, A.; Stiehl, V.; Herhoffer, M.; Mala, M.; Franke, J.: Reference Architecture and Agile Development Method for a Process-Driven Web Platform based on the BPMN-Standard and Process Engines. *Procedia CIRP* (2021a).
- Schäffer, E.; Stiehl, V.; Schwab, P.K.; Mayr, A.; Lierhammer, J.; Franke, J.: Process-Driven Approach within the Engineering Domain by Combining Business Process Model and Notation (BPMN) with Process Engines. *Procedia CIRP* 96 (2021b) 57, pp. 207–212.
- Schleipen, M.; Lüder, A.; Sauer, O.; Flatt, H.; Jasperneite, J.: Requirements and concept for Plug-and-Work. at - Automatisierungstechnik (2015), pp. 801–820.
- Silver, B.; Fischli, S.: *BPMN Methode und Stil*: Cody-Cassidy Press 2012.
- Steindl, G.; Kastner, W.: Semantic Microservice Framework for Digital Twins. *Applied Sciences* 11 (2021) 12, 5633 (without page numbers).
- Stiehl, V.: *Process-Driven Applications with BPMN*. Cham: Springer International Publishing 2014.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen Grundlagen: VDI, 2014.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE 3682 Blatt 1: Formalisierte Prozessbeschreibungen: Konzept und grafische Darstellung: VDI, 2015.
- Vlasov, A.I.; Gonoshilov, D.S.: Simulation of manufacturing systems using BPMN visual tools. *Journal of Physics: Conference Series* 1353 (2019) 1, 12043 (without page numbers).
- Vom Brocke, J.; Mendling, J.; Rosemann, M. (Hrsg.): *Business Process Management Cases Vol. 2: Digital Transformation - Strategy, Processes and Execution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021.
- Yu, F.; Zheng, C.: Tools, application areas and challenges of factory simulation in Small and Medium-Sized Enterprises – A Review. *Procedia CIRP* 104 (2021), pp. 399–404.

*Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

To Batch or Not to Batch? Real-time Continuous Batch Optimization in a Semiconductor Work Center Environment

Analyse eines digitalen Zwillings zur zeitkontinuierlichen Batchoptimierung in der Halbleiterfertigung

Holger Brandl, Philipp Roßbach

SYSTEMA Systementwicklung Dipl.-Inf. Manfred Austen GmbH, Dresden
(Germany), holger.brandl@systema.com, philipp.rossbach@systema.com

Hajo Terbrack

Technische Universität Dresden, Chair of Production Economy and Information
Technology, Zittau (Germany), hajo.terbrack@mailbox.tu-dresden.de

Abstract: Motivated by the ongoing growth in demand for microchips, high production costs and the complex interplay of human, machine, material and method (4M), suppliers strive to develop more advanced production planning and control regimes for semiconductor production. Batching decisions often dramatically influence the overall performance of wafer fabs in terms of capacity utilization, due date compliance, cycle time and variability. To optimize such processes, we present an integrated testbed for batch formation optimization. Using a simulation of multiple semiconductor work centers, we explore how to optimize work in progress (WIP) flow with a continuous real-time scheduler and previously published batch formation heuristics. The proposed solver is designed to only optimize capacity-limited operations. By considering real-world operations requirements and semiconductor process specifics such as qualification criteria and re-entrance in our model, we demonstrate how to realize significant throughput gains. We explore and demonstrate the developed digital twin through a powerful BI frontend for historical analysis and real-time shop floor monitoring.

1 Introduction

Semiconductor production is one of the most complex production processes. Especially wafer fabrication represents a challenging task with flows of 300 to 2000 steps, a high degree of flow cyclicity and re-entrance, varying step process times ranging between a couple of minutes and 24 hours, high maintenance workload, complex and time-consuming qualification rules, heterogeneous machines within

work centers, sequence-dependent setup times, a high product mix, as well as resulting average cycle times of up to 25 weeks. In addition, besides single wafer or lot processing, a considerable amount of semi frontend processes is performed in batches. In fact, up to one third of the operations in a wafer fab are performed on batch processing machines (Rocholl et al. 2020, Mönch et al. 2013, 2018).

The paper aims at contributing to both, research and practice, by embedding a real-time optimization engine developed to improve batching decisions and increase throughput into a semiconductor wafer production simulation model. For that, the article is structured as follows. First, key characteristics of semiconductor batch building as well as several methods for batch sizing, widely considered in research and industrial practice, are introduced. Then, we describe the use case, which we have modeled in a hybrid simulation environment linked to an optimization engine. Finally, we will discuss the results of our analysis by comparing the system performance against classical baseline planning and batch formation methods. The article concludes with a discussion pointing out possible improvements to the developed methods and model.

2 Batch Processing in Wafer Fabs

Lot batching is typically distinguished into s-batching and p-batching. In the former case, the process time of the batching operation equals the sum of the process times of all lots in a batch because lots are processed sequentially. However, more important in semiconductor production is the latter case, p-batching, whereby lots are processed in parallel and the batch process time equals either the maximum process time of all lots that form a batch or a specific process time irrespective of the number of lots in a batch (Mönch et al. 2009, 2011).

In contrast to other operations in semiconductor frontend production, process times of batch operations are often very long (up to 24 hours). With bottleneck management, line control is striving to maximize batch size and capacity utilization. While optimizing batch size, other production factors need to be considered as well, such as process timers, due dates, and work in progress (WIP). For instance, by off-loading multiple lots to the next operation after a batch operation is finished, long queues in front of non-batching machines and a nonlinear product flow can occur (Hopp and Spearman 2011, Mönch et al. 2011, Rocholl et al. 2020). Vice versa, line control needs to ensure that batch tools do not run dry to prevent tool standby. To form a batch, lots must meet specific process and product-dependent requirements. Typically, only lots of the same product technology can be grouped into a batch. Moreover, all lots need to be ready for processing, therefore released, placed in front of the tool and not on hold status. Furthermore, time constraints between two or more consecutive process steps may need to be considered. In that case, the associated operations have to be executed within the determined time window to avoid WIP degradation or scrap. In addition, batch-processing machines have a minimum and maximum batch size which must be ensured when processing the lots.

In summary, while determining the optimal batch size for each operation, a trade-off between high-capacity utilization on the one hand, and delay minimization, low variability and cycle time on the other hand, needs to be achieved. For that, batching decisions must be linked to the overall planning approach in a semiconductor

production context, e.g., addressing tool capabilities, reacting to machine breakdowns and considering operator availability.

So far, research has addressed semiconductor batch sizing in multiple ways as in terms of queuing and control theory, look-ahead policies and several scheduling approaches (Fowler and Mönch 2022). By means of computational performance but also for the sake of understandability and implementation effort, typically, simple heuristics are used as dispatching schemes for production execution in wafer fabs. The same holds true for batching decisions as most wafer-fabs perform batch sizing by policies based on a minimum batch size (MBS) (Koo and Ruiz 2020). In such threshold schemes, a specific minimum batch size S is considered and a batch is built as soon as at least S lots which are capable of being batched together are waiting in the queue. With respect to the minimum batch size S , different batching decisions can be derived. While a value of 1 for S allows single lot processing, S equal to the capacity of the batch processing machine ensures that only full batches are loaded (Solomon et al. 2002).

More advanced batching policies were proposed consuming upstream and/or downstream WIP to be considered in batch formation. As an upstream policy example, the look-ahead batching rule by Koo and Ruiz (2020) extends the MBS scheme to emphasize potential savings in waiting time. If more time can be saved by including an upcoming lot in a batch than the delay of the existing lots in the queue, the batch loading decision is postponed until the lot arrives at the operation. On the other hand, if the resulting overall delay of the existing lots in a queue exceeds the time savings expected with the next lot arrival and delayed batch loading, the batch is built immediately and loaded to the machine.

Despite a considerable body of research in queuing theory and operations research, batch optimization remains a challenging problem with often not-realized optimization potential in wafer fabs. Furthermore, previous work often neglected the operational requirements: Because of complex work center dynamics, schedules need to be updated frequently and users expect close-to-real-time updates. Based on these considerations, this paper proposes an improved solution approach for real-time semiconductor batching formation and optimization.

3 Bottleneck Operations in Semiconductor Production

From the theory of constraints, it is known that the throughput of any system is determined by one bottleneck under steady state assumption. However, as production requirements are constantly in flux, in particular in high-mix, low-volume production facilities, bottlenecks typically vary over time as described by Chen et al. (2006). Importantly, the number of non-bottleneck steps will almost always outnumber the possible bottleneck steps by an order of magnitude.

Figure 1 shows the typical structure of a semiconductor frontend production facility, cyclic routes with lot reentrance and possible tool dedications, as well as its work center organization. Within the scope of this paper, tools are only characterized by two attributes: First, tools either perform s/p-batching or process single lots. Second, some tools are rate-limiting bottlenecks under certain production and order conditions.

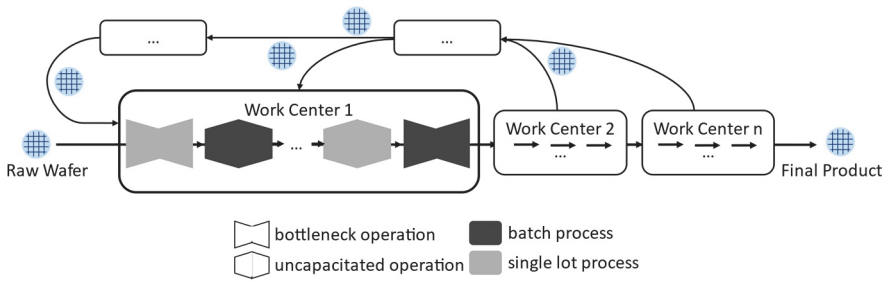


Figure 1: Semiconductor frontend production from a batching and bottleneck perspective; Importantly, the number of bottleneck operations is always much lower than the number of non-capacity limited operations within any work center. Different process flows, including some of reentrant nature, as well as different products reflect some of the complexity of the industry.

In Brandl et al. (2022), we presented a hybrid simulation model to study wafer fabrication. The factory state model proposed by Luhn et al. (2017) was used as a 4M abstraction of the semiconductor frontend production process. The model was implemented into a digital factory twin using the open-source discrete-event simulation engine “kalasim” (Brandl 2022) designed for complex industrial applications and with software development best practices in mind. The model allows studying the complex spatio-temporal alignment of production resources in the modeled frontend wafer fab. Also, complementary processes such as qualification, maintenance, engineering, logistics, and material preparation as well as operator activities were included in the model. The model allows for configurable route-definitions, s/p batching, sequence-dependent setup, and emits metrics for tools, lots and individual wafers.

4 Batch Formation Optimization

For the study at hand, we complemented our simulation model of Brandl et al. (2022) with a more configurable dispatching engine. First, we added support for configurable batching rules. Second and more importantly, we implemented support for hybrid execution planning in the following way: We propose a hybrid execution planning and optimization model by which only capacity-limited operations are scheduled globally, and non-limited operations are governed by event-driven dispatching rules. With this hybrid line-control model, the computational requirements of WIP flow optimization and batch formation across work centers are significantly reduced.

This flexible job-shop problem (FJSP) scheduler with batch formation support was implemented using a chained graph approach with tools as roots within the framework proposed by De Smet (2006). Batches are allowed to be formed based on a configurable batching criterion within a minimum and a maximum batch size. If adjacent lots along a solver chain satisfy the batching criterion but do not fulfill the minimum batch size requirements, lots are not batched. From a process perspective these lots would still be run along with test-wafer batcher, adding to the overall production costs. The objective function penalizes such runs. While the simulation

model is capable of consuming cyclicity with regard to process routes, reentrant flows are not yet implemented in the embedded optimization model described next.

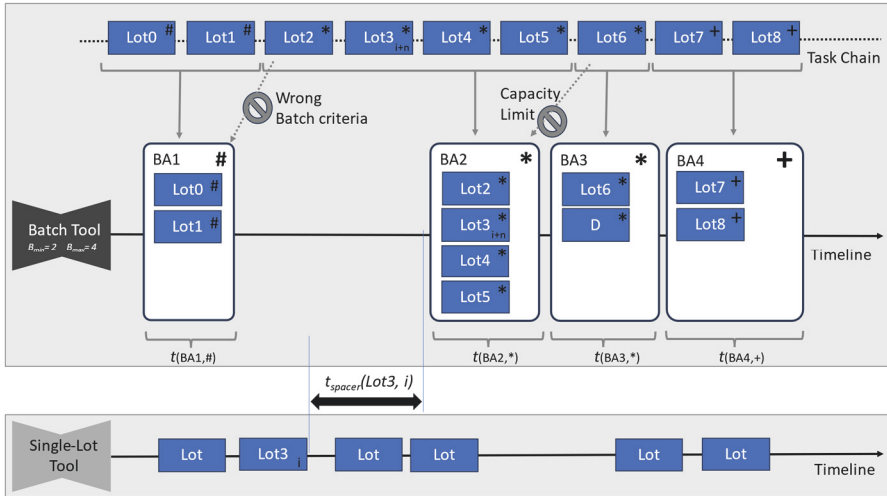


Figure 2: Batch & Timeline formation. In the example the single processing and the batch tool are considered as bottlenecks. For batch formation, sequentially aligned lots of the chained graph approach rooted in the tool, are evaluated for stretches of matching batch criteria and capacity. To compute time coordinates, additional restrictions based on the individual routes are considered. For example, a Lot3 which is first scheduled at the single-lot tool for its process step i , needs to undergo n additional steps not included the optimization process before arriving at step $i+n$. This is modelled via a spacer element $t_{spacer}(Lot3, i)$ to ensure feasibility of the computed execution plan. Different batches will have varying times $t(BA)$ depending on the operation-dependent tool recipes. Because batch formation is independent from scoring, some solutions would lead to additional costs, such as Lot6 which is not properly batched with WIP and thus is processed along with a dummy wafer cassette D .

The solver (Figure 2) is implemented as a 2-step process: First, the schedule structure by evaluating batching criteria discussed above to form batches in a greedy manner starting from the origin of the tool chain. Secondly, with batches in place, the solver computes the final schedule by considering virtual spacer times between process steps. These process step dependent spacer elements along each individual lot timeline are set to the average cycle time between solver-optimized bottleneck processes.

Multiple constraints of the proposed bottleneck scheduler were incorporated to support optimization using different score levels indicating severity of the score and to allow for balancing of metrics within the objective function of the scheduler. Non-maximal batches are penalized directly, the lack of batch formation (e.g., single lots) is penalized because unbatched WIP is typically either stalled or batched with dummy wafers (depending on the process) leading to higher production costs. The solver model accounts for sequence-dependent setup, tool qualification settings (counter-

based requalification), operator availability, due date compliance, and lot prioritization. Because of the complex business domain, we believe a constraint programming approach with configurable score weights to be a more efficient problem formulation than other more classical representations such as mixed-integer programming.

5 Results

As a baseline for production execution and batch building, we include several dispatching rules commonly used in industrial practice. For conventional dispatching schemes which do not take into account batch building by default, we consider a “greedy approach” by which a batch is formed if more than one lot of the same operation and product is available for processing at the tool in the moment the next lot is dispatched. In addition, we extended our dispatching engine to support previously published batch formation heuristics. When these batching heuristics are executed, equipment not capable of batch processing are ruled by conventional dispatching schemes instead. Furthermore, we adjusted the batching heuristics to allow for batching with a smaller batch size than the minimum as soon as lots were waiting more than 24 hours in front of an operation.

In addition to the proposed hybrid bottleneck scheduler, we considered the following baseline heuristics for characterizing production in our model:

- First In First Out scheme with greedy batch building
- Earliest Due Date scheme with greedy batch building
- Setup Avoidance scheme with greedy batch building
- Minimum Batch Size rule with different values for minimum batch size
- Look Ahead heuristic with different values for minimum batch size

To study the model, we configured a simulation scenario with two adjacent work centers, namely epitaxy and furnace. Each work center is modeled with a single bottleneck operation. All products shared the same route from epitaxy to furnace, but were configured with different tool recipe parameters. Each route was configured with four additional non-capacity limited steps. For conducting experiments with our model, we parameterized the simulation in accordance with an existing frontend production of one of our manufacturing partners. The furnace step was modeled as p-batching tools with a minimum and maximum batch size of 2 and 4, respectively. WIP was released stochastically using a non-uniform distribution over the 20 products. Due dates were stochastically modeled around the average cycle time of 4 days with a variance of 1 day. The used batching criteria was set to only batch lots of the same product at the same operation. One measurement operation along the route occurred twice, to reflect typical route topologies in semiconductor frontend production.

All simulation experiments were performed under controlled randomization conditions with replication except for the real-time integration experiments (see chapter 6). Both the simulation and the used multi-threaded bottleneck scheduler were configured and tested to provide deterministic results. Results and metrics were computed, analyzed and visualized in R.

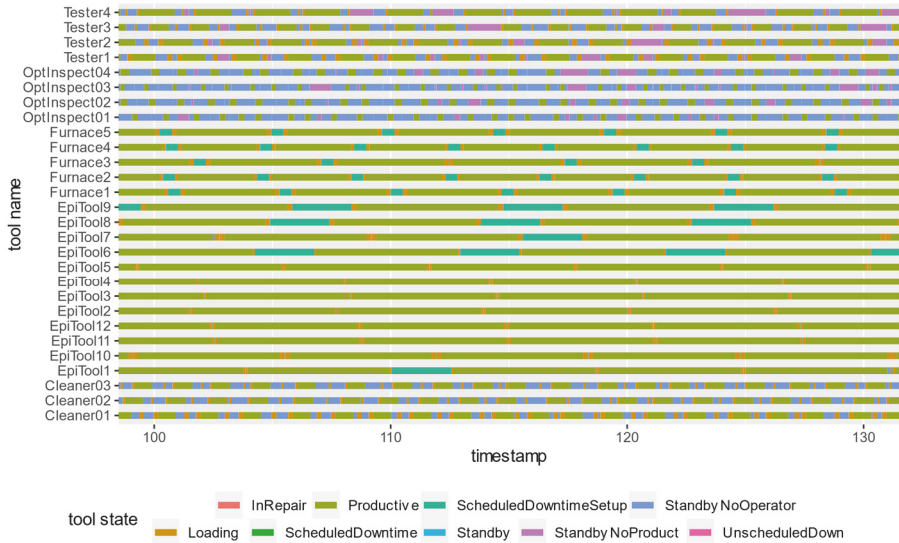


Figure 3: Example production schedule when using Look-Ahead heuristic with a minimum batch size of 3 for batch formation. Indicated by color are the various tool statuses. Depending on the work center, there are yet different challenges, from considerable setup efforts at the epitaxy reactors, to understaffing at the optical inspection.

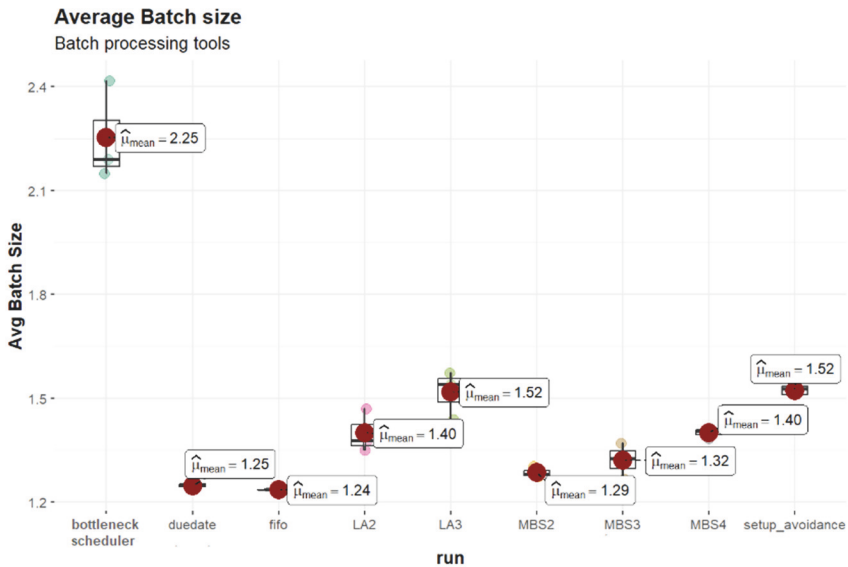


Figure 4: Average batch size along simulation runs given for each considered heuristic. The proposed bottleneck scheduler was found to outperform other methods regarding the average realized batch size in the resulting schedule averaged over multiple runs.

To account for different production objectives, we computed different process KPIs which are compared in Figure 5. To enable industrial engineers, KPIs were normalized into a radar chart display. Intuitively, the object is to maximize the area of the polygon.

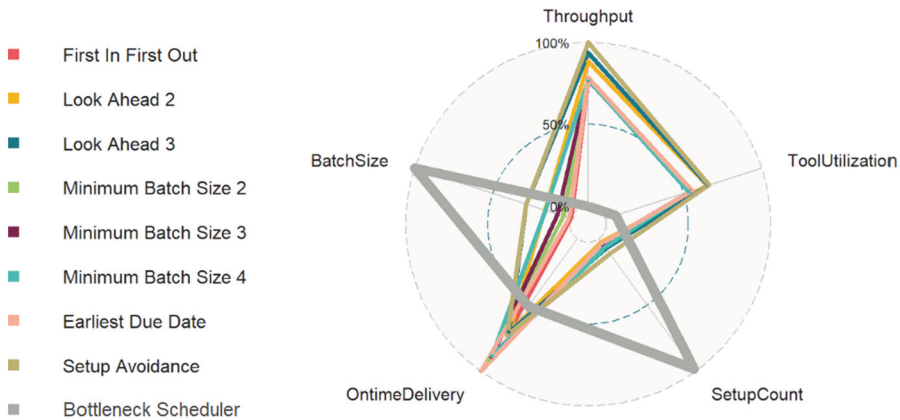


Figure 5: Due to multiple objectives relevant in semiconductor production planning, resulting production plans were analyzed in terms of several KPIs and normalized to allow for comparison. In its current configuration, the bottleneck scheduler is highly optimized with regard to batch sizing but sacrifices a lot tool utilization. This common challenge requires a careful balancing of partially conflicting production objectives based on business and operational consideration.

6 Real-time Fab Optimization

In most frontend operations, scheduling is still an underused optimization method due to the challenging combinatorics, high production dynamics and computation requirements. Tool assignments are often only indirectly computed via ordering schemes that sort WIP given lot requirements and tool capabilities. The advantage of doing so is the ability to dispatch material in real-time by consuming factory changes via a message-oriented middleware.

Still, traditionally a solver would still require a recompute model, where the schedule is temporarily out-of-sync with the shopfloor while being recomputed. To overcome this limitation, we have operationalized the proposed bottleneck scheduler using a real-time change model proposed by De Smet (2006): Material changes are propagated into a running solver using a framework provided change API. Instantaneously, the solver picks up these changes when exploring a better solution. With this model, scheduling can be realized as an event-driven planning function similar to traditional lot dispatching. Another benefit of the proposed model is that the user is no longer required to define termination conditions, which may miss the most optimal solution.

7 Discussion

A major challenge of scheduling in semiconductor production is the high process complexity, its high dynamics, and the resulting invalidation of an existing schedule. Schedule recomputation is severely limited by CPU time, in particular when optimization WIP flow and batch formation across work centers. Our proposed hybrid batch formation and route optimization model aims to combine both, scheduling and dispatching to maximize batch formation. By complementing a planning heuristic for capacity limited process steps with an event-driven real-time dispatcher, we propose a best-of-breed fusion planner to optimize workload across a series of work centers. Following this approach, we consider several work centers with bottleneck operations and batch processing machines that are controlled by a scheduling engine while the remaining process steps along the process flows are ruled by a dispatching module.

During the simulation study, multiple aspects were found to have potential for further investigation and improvement. First, WIP flow is currently enforced via constraints, leading to much more complex combinatorics. By using built-in hard constraints when exploring the solution space in the solver, we plan to further improve solver performance considerably. Also, by design, the bottleneck scheduler was found to be not yet suited to form batches in reentrant flows. As individual moves/changes in a FJSP require widespread adjustments to temporal and structural properties, it remains to be shown if the design can be extended for reentrant flows as well.

By running the scheduler as an event-driven real-time planning engine next to the shopfloor simulation model, different batch heuristics and factory KPIs could be effectively studied in an integrated testbed. Because of the used code-first and not UI-centered simulation framework, we could enable multiple engineers and analysts to evolve the model collaboratively. For an extended analysis and additional metrics, the reader is referred to a supplementary jupyter notebook (<https://www.systema.com/asim2023>).

References

- Brandl, H., Rossbach, P., Terbrack, H., Sprogies, T. (2022): Maximizing Throughput, Due Date Compliance and Other Partially Conflicting Objectives Using Multifactorial AI-powered Optimization, Winter Simulation Conference 2022, December 11-14, Singapore.
- Brandl, H. (2022). "Code-first Process Modeling and Analysis with Kalasim". FOSDEM'22, <https://fosdem.org>, accessed 8th February 2023.
- Chen K.S., Lee, M. S., Pulat, S. P., A. Moses, S. (2006): The shifting bottleneck procedure for job-shops with parallel machines, International Journal of Industrial and Systems Engineering (IJISE), Vol. 1, No. 1/2, 2006.
- De Smet, G. (2006). "OptaPlanner User Guide", Red Hat Inc., <https://www.optaplanner.org>, accessed 8th February 2023.
- Fowler, J. W., Mönch, L. (2022). A survey of scheduling with parallel batch (p-batch) processing. European journal of operational research, 298(1), 1-24.
- Hopp, W. J., Spearman, M. L. (2011): Factory Physics, 3rd edn. Waveland Press.
- Koo, P. H., Ruiz, R. (2020). Simulation-Based Analysis on Operational Control of Batch Processors in Wafer Fabrication. Applied Sciences, 10(17), 5936.

- Luhn, G., Ertelt, M., Zinner, M. (2017): Real-Time Information Systems and Methodology based on Continuous Homomorphic Processing in Linear Information Spaces; EP 3114620 A1,
- Mönch, L., Fowler, J. W., Dauzère-Pérès, S., Mason, S. J., & Rose, O. (2009). Scheduling semiconductor manufacturing operations: Problems, solution techniques, and future challenges. In: 4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory & Applications, Dublin, Ireland.
- Mönch, L., Fowler, J. W., Dauzère-Pérès, S., Mason, S. J., & Rose, O. (2011). A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of scheduling*, 14, 583-599.
- Mönch L., Fowler J. W., Mason S. J. (2013): *Production Planning and Control for Wafer Fabrication facilities: Modeling, analysis, and systems*. Springer, New York.
- Mönch, L., Uzsoy, R., Fowler, J. W. (2018). A survey of semiconductor supply chain models part I: Semiconductor supply chains, strategic network design, and supply chain simulation. *International Journal of Production Research*, 56(13), 4524-4545.
- Rocholl, J., Mönch, L., & Fowler, J. (2020). Bi-criteria parallel batch machine scheduling to minimize total weighted tardiness and electricity cost. *Journal of Business Economics*, 90(9), 1345-1381.
- Solomon, L., Fowler, J. W., Pfund, M., Jensen, P. H. (2002). The inclusion of future arrivals and downstream setups into wafer fabrication batch processing decisions. *Journal of Electronics Manufacturing*, 11(02), 149-159.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Systematische Zuordnung von Interaktionsmustern der Selbstorganisation zu Arten von Entscheidungsproblemen am Beispiel der Produktionsplanung und -steuerung

Systematic Assignment of Interaction Patterns of Self-organization to Types of Decision-making Problems Using the Example of Production Planning and Control

Martin Krockert, Marvin Matthes, Torsten Munkelt
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden (Germany),
martin.krockert@htw-dresden.de, marvin.matthes@htw-dresden.de,
torsten.munkelt@htw-dresden.de

Abstract: The design of interactions in self-organizing systems remains a challenging task to this day. Nature offers numerous interaction patterns to tackle various decision problems. This paper presents a classification of decision problems, enabling the mapping of interaction patterns in self-organizing systems onto common decision problems in production planning and control. Furthermore, concrete solution proposals for applying the interaction patterns to decision problems in production planning and control are derived and discussed, and their simulated testing is exemplarily designed using an example.

1 Motivation zur Nutzung sich selbst organisierender Systeme in der Produktionsplanung und -steuerung

Die weitreichende Digitalisierung und Entwicklungen des IIoT ermöglichen und erfordern dezentralisierte Entscheidungskonzepte, wie sie in der Natur in sich selbst organisierenden Systemen vorkommen. Die Übertragung von Selbstorganisation in reale Anwendungen ist bis heute eine Herausforderung und folgt keinem einheitlichen Vorgehen. Die Entwicklung eines sich selbst organisierenden Systems (SOS) erfordert eine von Grund auf andere Herangehensweise als die Entwicklung anderer Informationssysteme. Existierende Herangehensweisen zur Konzeption wurden bereits von Steghöfer (2014) evaluiert. Allgemein gilt: Aus Top-Down-Perspektive ist es schwer, geeignete lokale Regeln für das Verhalten der Elemente SOS zu formulieren, und aus Bottom-up-Perspektive ist es oft unklar, wie lokale Regeln zusammenwirken, um ein gewünschtes Verhalten hervorzubringen (Richter 2009).

Für die Ausgestaltung der Interaktionen zwischen den Elementen eines SOSs gibt es bisher kein systematisches Vorgehen. Die Bestimmung der möglichen Interaktionen erfolgt meist auf Grundlage von Einzelexperimenten. Daher klassifiziert dieser Beitrag Entscheidungsprobleme der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (Domschke 1997) und ordnet nachfolgend jeder Problemklasse ein oder mehrere potenzielle Interaktionsmuster zu. Im Anschluss wird ein systematisches Vorgehen zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster vorgestellt, welches zeigt, wie gut die Interaktionsmuster das Problem lösen, dem sie zugeordnet worden sind.

2 Entscheidungsprobleme der Produktionsplanung und -steuerung

Viele Teilaufgaben der PPS stellen Entscheidungsprobleme dar. Sind alle erforderlichen Informationen zur Lösung der Aufgabe vorhanden, das Ziel eindeutig und der Lösungsweg bekannt, ist die Aufgabe nach Brauchlin (1990) wohlstrukturiert und somit kein Entscheidungsproblem. Für entsprechende Aufgaben muss daher keine Kategorisierung vorgenommen werden. Bei schlecht strukturierten Aufgaben liegen Entscheidungsprobleme vor, da entweder der Ausgangszustand unbekannt ist, der Zielzustand mehrere mögliche Lösungen aufweist oder der Weg zur Lösung unklar ist (Schlicksupp 1977, S. 51-66). Entscheidungsprobleme der PPS können wie folgt klassifiziert werden (Domschke 1997, S. 29-31):

Arbeitsverteilung findet geeignete Kombinationen von Arbeitsgängen und Ressourcentypen. Das heißt, es geht ausschließlich um die Zuordnung, nicht um die Reihenfolge der Bearbeitung und auch nicht um die Zuweisung zu den ausführenden Ressourcen. Arbeitsverteilung betrifft die Grob- und Kapazitätsplanung, sowie zum Teil die Sequenzplanung der PPS.

Leistungsabstimmung synchronisiert die von den Ressourcen zu erbringende Leistung zeitlich und mengenmäßig. Leistungsabstimmung betrifft primär Produktionen mit heterogenen Ressourcen, in denen Arbeitsgänge so auf den Ressourcen zu verteilen sind, dass eine möglichst gleichmäßige Produktionsgeschwindigkeit vorherrscht. Leistungsabstimmung betrifft die Kapazitätsplanung der PPS.

Reihenfolgebestimmung nimmt unter den vorgegebenen Zielen und Restriktionen eine zeitliche Zuordnung von Arbeitsgängen zu den ausführenden Ressourcen vor, was vornehmlich der Sequenzplanung von PPS entspricht.

Gruppierung fasst Ressourcen, Arbeitsgänge und Materialien zusammen. Zu den Gruppierungsproblemen der PPS zählen die Primärbedarfsprognose, die Losgrößenplanung, welche Produktionsaufträge bzw. Arbeitsgänge mit gleichem Rüstaufwand gruppiert, und die Sequenzplanung.

Transport gestaltet Bewegungsvorgänge räumlich und zeitlich aus, was die Festlegung von Transportwegen, -mitteln und -losen umfasst. Er betrifft hauptsächlich die Kapazitätsplanung.

Konstruktion bezieht sich auf gemeinsame Aspekte von Gruppen- und Raumbeziehungen. Sie umfasst sowohl die strategische Standort- und Layoutplanung als auch die operative Lagerplatzbestimmung und das Vorgehen bei der Montage. Da

bei der Grob-Kapazitätsplanung auch die räumliche Verteilung der Arbeit über Produktionsstätten hinweg eine Rolle spielt, ist sie auch ein Konstruktionsproblem.

Produktionseingriff als letzte Aufgabe betrifft nahezu alle Problemstellungen, da Entscheidungen, die hier getroffen werden, die Ressourcenbelegung, die Reihenfolgen und die Lose beeinflusst. Tabelle 1 ordnet die Aufgaben der PPS den Entscheidungsproblemen zu.

Tabelle 1: Zuordnung von Aufgaben der PPS zu Entscheidungsproblemen

Aufgaben			Probleme					
			Arbeitsverteilung	Reihenfolgeplanung	Leistungsabstimmung	Gruppierung	Transport	Konstruktion
Planung	Primärbedarfsplanung	Primärbedarfsprognose				+		
		Grob-Kapazitätsplanung	+					+
	Sekundärbedarfsplanung	Materialbedarfsplanung	wohlstrukturiert					
		Losgrößenplanung				+		
	Terminierung	Durchlaufterminierung	wohlstrukturiert					
Kapazitätsplanung		+		+		+		
Steuerung	Auftragsfreigabe	Verfügbarkeitsprüfung	wohlstrukturiert					
		Sequenzplanung	+	+				
	Ausführung	Produktionsüberwachung	wohlstrukturiert					
		Produktionseingriff	+	+	+	+	+	

3 Von Interaktionsmustern über Entscheidungsprobleme zur Lösung von Aufgaben der PPS

Die Natur und ihre Individuen bilden selbst ein *System of Systems* und müssen unter Unsicherheit und den Zwängen des jeweils umgebenden Systems bestehen. Die Natur hat eine Vielzahl verschiedener Interaktionsmuster zur Koordination von Individuen hervorgebracht, um der Unsicherheit und den Zwängen durch die Umgebung zu begegnen. Diese meist einfachen Interaktionsmuster führen zum Teil zu komplexen Verhaltensmustern und letztlich zu Selbstorganisation.

Foraging: Von der Nahrungssuche der Ameisen abgeleitet, ist die „*Optimal Foraging Theory*“ entstanden, die sich mit Individuen beschäftigt, die auf der Suche nach Nahrung ihre Umgebung stochastisch durchsuchen. Alle Individuen hinterlassen auf Wegen zu und von der Nahrungsquelle Pheromone. Die Spuren können sich überlagern, was zur Intensivierung der Spuren führt und die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass weitere Individuen diesen Spuren folgen (Brabazon 2018, S. 55). Foraging hat effektives Interaktionsmuster zum Auffinden von Ressourcen etabliert und kann somit der Arbeitsverteilung und den Transportproblemen zugeordnet werden. Die beim Foraging hinterlassene Pheromonspur wirkt zudem als Indikator für

die Leistungsabstimmung, da sie indiziert, wie viele Insekten benötigt werden, um die Ressource abzutragen.

Autoaggregation: Bei der Autoaggregation werden die Individuen von in der Umgebung verfügbaren Ressourcen angezogen (Nwoko 2021). Stehen genügend Ressourcen zur Verfügung, bewegen sich die Individuen auf der Suche selbstständig. Steht nur ein begrenzter Vorrat an Ressourcen zur Verfügung, verströmen die Individuen ein Pheromon. Andere Individuen folgen dem Gradienten des Pheromons und bewegen sich somit aufeinander zu. Die Individuen bilden ein Cluster und begeben sich gemeinsam auf die Suche nach ertragreichen Ressourcen. Wurde eine ertragreiche Ressource gefunden, zerfällt das Cluster wieder. Ähnlich dem Foraging sorgt Autoaggregation dafür, dass genügend Ressourcen am richtigen Ort zur richtigen Zeit zur Verfügung stehen, und wird somit der Arbeitsverteilung zugeordnet.

Morphogenese: Bei der Morphogenese sondern die Individuen eine Substanz (Morphogen) ab, die sich gleichmäßig ausbreitet. Individuen können durch Wahrnehmung von Morphogenen ihren Abstand zur Quelle des Morphogens bestimmen und so feststellen, wo sie sich befinden. Dabei kann in dem Morphogen auch die vom Sender aktuell wahrgenommene Funktion kodiert werden. Die Bestimmung der Position kann entweder durch die Absonderung verschiedener Morphogene oder die Bewegung des wahrnehmenden Individuums erfolgen. Je nach Position wissen die Individuen, wo sie sich befinden. Anhand der Konzentration können die Individuen auch bestimmen, ob ausreichend Individuen für die Realisierung einer bestimmten Aufgabe zur Verfügung stehen (Carroll 2008). Morphogenese dient der Orts- und Aufgabenbestimmung im Raum und ist demzufolge der Konstruktion und Arbeitsverteilung zuzuordnen.

Weben: Beim Weben verbinden Individuen Punkte mit einer Schleppleine. Initial streifen die am kooperativen Netzbau beteiligten Individuen zufällig durch die Umgebung und weben eine Schleppleine zwischen zwei zufälligen Punkten. Die Individuen werden im weiteren Verlauf von vorhandenen Schleppleinen angezogen und ziehen es vor, auf einer vorhandenen Schleppleine zu laufen. Neue Schleppleinen werden zum Abkürzen des Weges zwischen dem Ausgangspunkt und dem Ziel gezogen. Dieses Vorgehen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Schleppleine dort beginnt, wo eine andere endet, und lässt ein dreidimensionales Netz entstehen (Bourjot 2001), dessen Schleppleinen immer den kürzesten Pfad zwischen zwei Punkten darstellen (Mamei 2006). Weben ist ein Interaktionsmuster zur Konstruktion von Strukturen, welche zugleich effiziente Punkt-zu-Punkt-Verbindungen schaffen, und daher auch dem Transportproblem zugehörig.

Strukturbau: Zur Konstruktion komplexer Strukturen erschaffen Individuen kleine Bausteine und reichern diese mit Pheromonen an (Heyde 2021). Mit diesen Bausteinen bewegen sich die Individuen zufällig im Raum, bevorzugen aber die Richtung der stärksten Pheromonkonzentration. Während sie sich durch den Raum bewegen, entscheiden sie zufällig, ob sie den Baustein an ihrer aktuellen Position ablegen. Das abgesonderte Pheromon hat nur eine geringe Reichweite und kann daher nur ein lokales Signal abgeben. Das Vorgehen führt zunächst zu verstreutem Platzieren einzelner Bausteine. Die Bausteine ziehen aber weitere Individuen an. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass an ihrer Stelle weitere Bausteine platziert werden. Die Bausteine werden beim Ablegen immer in der Mitte des Stapels platziert. Durch die Überlagerung der Pheromone sind sie an dieser Position am stärksten, und die

Stapel wachsen eher vertikal als horizontal und bilden säulenartige Strukturen. Strukturbau wird der Konstruktion von Strukturen und dem Transportproblem zugeordnet.

Strömungsverhalten: Im Englischen als Flocking bezeichnet, beschreibt es, wie ein Schwarm bzw. eine Herde durch Zentrierung, Kollisionsvermeidung und Geschwindigkeitsanpassung entsteht (Reynolds 1987). Flocking kommt zustande, wenn die Individuen versuchen, so nahe wie möglich beieinanderzubleiben (Zentrierung). Durch Kollisionsvermeidung entfernt sich ein Individuum, bevor es zum Zusammenstoß kommt. Dafür wird die eigene Geschwindigkeit stetig an die des Nachbarn angepasst. In Schwärmen übernehmen sogenannte Wächter die Leitfunktion. Sie reagieren sensibler als die anderen Individuen auf Umweltreize und geben die initiale Bewegungsrichtung vor, die von den anderen Individuen imitiert wird (Mamei 2006). Strömungsverhalten dient der Koordination sich bewegender Individuen, wird also dem Transport und der Leistungsabstimmung zugeordnet.

Muster-Sortierung: Muster-Sortierung sammelt Objekte anhand ihrer Eigenschaften und platziert gleichartige am gleichen Ort (Franks 1992, S. 120). Ähnlich dem Strukturbau bewegen sich die Individuen zufällig im Raum. Trifft ein Individuum beim Durchstreifen des Raumes auf eine Ansammlung ähnlicher Objekte, von denen eines nicht in das Schema der Ansammlung passt, nimmt das Individuum das nicht passende Objekt mit und legt es an einem Platz ab, an dem bereits viele Objekte liegen, die in das Schema des Objektes passen (Gardelli 2007). Muster-Sortierung eignet sich daher zur Lösung von Gruppierungsproblemen.

Quorum: Quorum (Beschlussfähigkeit) beschreibt ein Vorgehen, bei dem Individuen erkennen, wie viele ähnliche Individuen sich in ihrer Nähe befinden, und ihre Aktivität an diesen Individuen ausrichten. Dafür senden die Individuen ein Signal aus, das von anderen Individuen imitiert wird. Überschreitet das imitierte Signal eine bestimmte Stärke, wird eine neue Aktion ausgelöst (Parent 2008). Auf diese Weise werden Mehrheiten bestimmt und Aktivitäten der Individuen synchronisiert. Quorum ermöglicht auch, dass eine Menge von Individuen sich selbst sortiert, indem die Individuen sich auf die Signale zubewegen, die dem eigenen Signal ähnlich sind. Quorum ist ein Interaktionsmuster, das sich zur Synchronisation und zur Gruppenbildung eignet.

Ausgleichsmodell: Das Ausgleichsmodell verteilt Aufgaben anhand der Pheromonkonzentration, die ein Individuum wahrnimmt (Blonder 2011). Bei der regulären Abarbeitung ihrer Aufgaben kreuzen Individuen die Pheromonspuren anderer. Die Pheromonspuren kodieren die aktuelle Rolle der Pheromonquelle. Entspricht die wahrgenommene Verteilung der Rollen nicht der intrinsisch vorgegebenen Rollenverteilung, so wechselt das Individuum mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Rolle, die eine zu geringe Intensität aufweist. Das Ausgleichsmodell dient hauptsächlich der Aufgabenverteilung.

Markt: Er verteilt die Aufgaben durch einen Auktionsmechanismus. Der Wert einer Aufgabe wird durch den Wert einer gleichartigen, bereits erfüllten Aufgabe bestimmt oder durch erwartete Kosten, die durch die Bearbeitung entstehen. Der Wert der Aufgabe wird bei der Verteilung in ein Angebot gefasst, welches die Gegenseite annimmt oder mit einem Gegenangebot erwidert (Ye 2017). Der Markt ist ein soziales Interaktionsmuster und kann zu fast allem verwendet werden. Der Markt ist durch die

4 Konzept zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster

Im Folgenden wird ein Konzept für die Bewertung von Interaktionsmustern hinsichtlich ihrer Eignung vorgestellt, Probleme der PPS zu lösen. Abbildung 1 zeigt auf der linken Seite das Vorgehen zur Bewertung passender Interaktionsmuster. Auf der rechten Seite wird das Vorgehen exemplarisch auf die Losbildung angewandt.

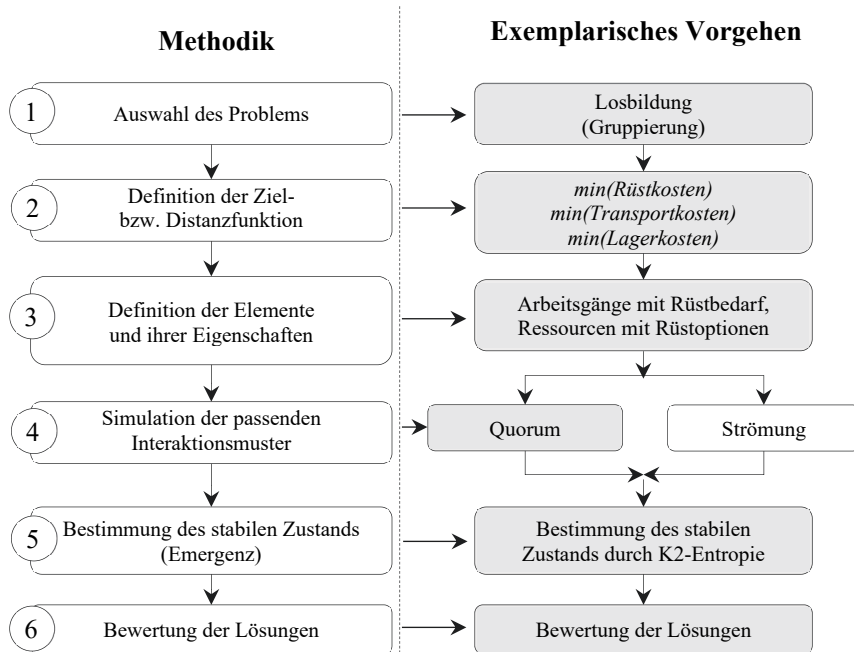


Abbildung 1: Konzept zur simulativen Bewertung geeigneter Interaktionsmuster der Selbstorganisation für dezentrale Koordination

Im ersten Schritt wird für das zu lösende PPS-Problem die passende Problemklasse gewählt (#1). Gemäß Tabelle 3 passt zur Losbildung die Problemklasse Gruppierung. Im zweiten Schritt werden die Zielfunktionen definiert, welche mini- oder maximiert werden sollen (#2). Im dritten Schritt werden die interagierenden Elemente definiert. Für die Losbildung sind das die Arbeitsgänge mit ihren jeweiligen Rüstbedarfen und die Ressourcen mit ihren entsprechenden Rüstoptionen, welche die Arbeitsgänge abarbeiten sollen (#3). Im vierten Schritt werden die passenden Interaktionsmuster simuliert. Für die Simulation wurde eine eigens für diesen Zweck entwickelte Aktorbasierte ereignisdiskrete Simulation „Akka.Hive“ (Krockert 2022) verwendet, welche Agenten bereitstellt, deren Verhalten beliebig austauschbar ist und deren Architektur dem Observer/Controller-Pattern folgt. Abbildung 2 zeigt ein abstraktes Schema der Architektur, das einen Observer und einen Controller enthält und ein darunter liegendes System zeigt, welches als „System under Observation and Control“ (SuOC) bezeichnet wird (Tomforde 2011). Der Observer überwacht alle im SuOC befindlichen Agenten des Systems, bewertet die Situation und berichtet das Ergebnis

an den Controller des Systems. Der Controller besitzt ein Regelwerk für die Parametrisierung der Agenten, dass er kontinuierlich nach den zu der Situation und seinen Zielen passenden Parametern für die Agenten durchsucht. Die passenden Parameter werden dann an wieder an die Agenten weitergeben, und steuert so das Verhalten des Systems in den durch die Parameter vorgegebenen Grenzen.

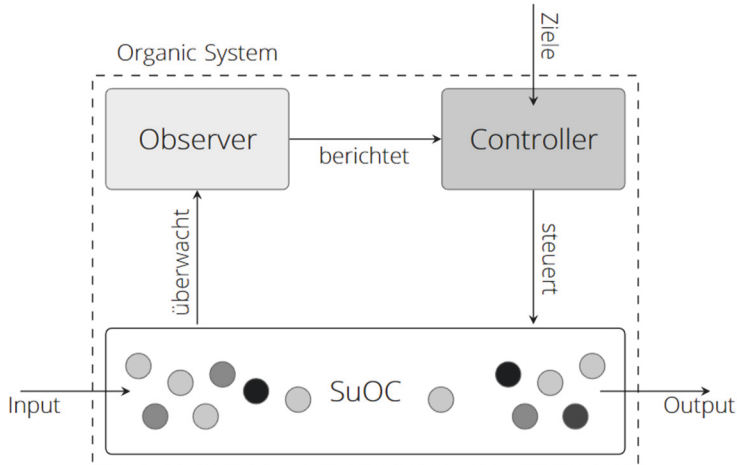


Abbildung 2: Observer/Controller Architektur (vgl. Tomforde 2011)

Jedes Asset der Produktion wird durch einen Agenten im SuOC repräsentiert und verfolgt seine eigenen Ziele. Beispielsweise minimieren Produktionsagenten, welche die Produktionsaufträge repräsentieren, die Durchlaufzeit, Lageragenten minimieren die Lagerkosten, und Maschinenagenten maximieren ihre Auslastung. Im Falle der Anwendung des Interaktionsmusters Quorums und seiner Verhaltensimplementierung für die einzelnen Agenten für Losbildung geschieht das wie folgt: Die Produktionsagenten signalisieren ihren Rüstbedarf für den nächsten anstehenden Arbeitsgang. Produktionsagenten, die den gleichen Rüstbedarf signalisiert haben, bilden eine Gruppe, wenn die Häufigkeit des Rüstsignals einen Schwellwert überschreitet, welcher ein Teil der Parametrisierung ist, die durch den Controller gesteuert wird. Diese Gruppe mit gleichem Rüstbedarf wird dann von einer Ressource bearbeitet, und es fällt nur einmal Rüstaufwand für diese Bearbeitung an.

Bis sich in einem sich selbst organisierenden Systemen effiziente Verhaltensweisen herausbilden, unterliegt es größeren Schwankungen. Ob bzw. wann sich ein System eingeschungen hat, kann mittels der Shannon- oder Kolmogorov-Entropie (K_2) bestimmt werden (#5). Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Losgrößen über der Zeit (links) und die Entwicklung der Losgrößen mittels „Time-Embedding“ (rechts). Es ist gut zu erkennen, wie sich die Losgröße in einem bestimmten Bereich stabilisiert. Die Analyse stammt aus einer Studie zur Eignung von Selbstorganisation zur PPS und umfasst eine Produktion mit 16 Maschinen und 100 Produkten, welche drei Wochen 24/7 simuliert worden ist (Krockert 2021). Im letzten Schritt werden die Interaktionsmuster bezüglich ihres Grades der Zielerreichung miteinander verglichen (#6).

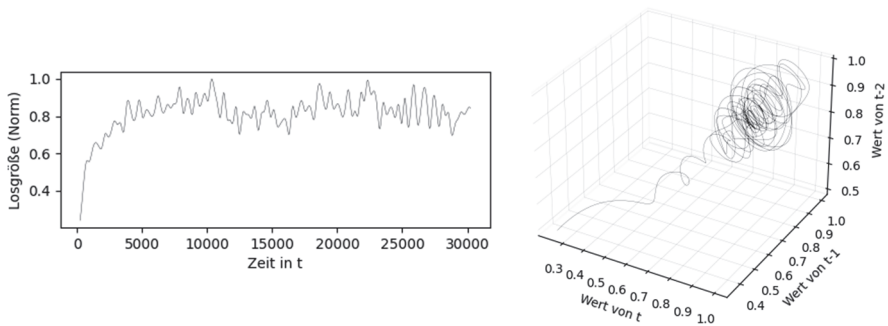


Abbildung 3: Normalisierte Entwicklung der Losgrößen über der Zeit 2D (links) und mittels Time-Delay-Embedding (rechts) nach Taken's Theorem (Takens 1981)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die Abbildung gängiger Entscheidungsprobleme der PPS auf Interaktionsmuster zur dezentralen Koordination sich selbst organisierender Systeme. Die Kategorisierung der Probleme in Problemklassen und deren Abbildung auf die Interaktionsmustern zeigt, welche Interaktionsmuster der Selbstorganisation zur Lösung welcher PPS-Probleme beitragen. Es wird ein Konzept zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster vorgestellt und exemplarisch auf das Problem der Losbildung angewandt. Zukünftige Schritte umfassen die Ableitung von einfachen Regelwerken für jedes Interaktionsmuster und deren Implementierung. Des Weiteren ist die Schaffung einer einheitlichen Schnittstelle zur Verwendung der Interaktionsmuster notwendig. Darauf aufbauend, kann die Automatisierung des in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehens zur Bewertung erfolgen und so ein Framework zur automatischen Suche und Bewertung geeigneter Interaktionsmuster entstehen. Akka.Hive bietet zudem die Möglichkeit, die Simulationsumgebung durch reale Produktions-Assets zu ersetzen und die simulierten und bereits stabilen Verhaltensweisen auf reale Produktionen anzuwenden.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Finanziert von der europäischen Union.

Literatur

- Blonder, B.; Dornhaus, A.: Time-ordered networks reveal limitations to information flow in ant colonies. In: PloS ONE 9(6) 2011.
- Brabazon, A.; McGarraghy, S.: Foraging-Inspired Optimisation Algorithms. Springer International Publishing 2018.
- Brauchlin, E.: Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik. Eine Einführung. 3. Aufl. Bern 1990
- Carroll, S. B.: Evo-devo and an expanding evolutionary synthesis: a genetic theory of morphological evolution. In: Cell 134 (2008), S. 25–36.

- Bourjot, C.; Chevrier, V.: Multi-agent simulation in biology: application to social spiders case. In: Agent Based Simulation. Passau, Germany 2001, S. 18–23.
- Ye, D.; Zhang, M.; Vasilakos, A. V.: A Survey of Self-Organization Mechanisms in Multiagent Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems 47 (2017), S. 441–461.
- Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Production planning: aspects of industrial engineering (Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte). 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer 1997.
- Franks, N. R.; Sendova-Franks, A. B.: Brood sorting by ants: distributing the workload over the work-surface. In: Behav Ecol Sociobiol 30 (1992).
- Gardelli, L.; Viroli, M.; Omicini, A.: Design Patterns for Self-organising Systems. In: Hans-Dieter Burkhard, Gabriela Lindemann, Rineke Verbrugge und László Zsolt Varga (Hrsg.): Multi-Agent Systems and Applications V, Bd. 4696. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 123–132.
- Heyde, A.; Guo, L.; Jost, C.; Theraulaz, G.; Mahadevan, L.: Self-organized biotectonics of termite nests. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118 (2021).
- Krockert, M.: Akka.Hive und Manufacturing on Actor Technologie, www.github.com/krockema/MATE, letzter Zugriff an 26.06.2023.
- Krockert M.; Matthes M.; Munkelt T.: Suitability of Self-Organization for Different Types of Production. In: Procedia Manufacturing 54 (2021), S. 124ff
- Mamei, M.; Menezes, R.; Tolksdorf, R.; Zambonelli, F.: Case studies for self-organization in computer science. In: Journal of Systems Architecture 52 (2006).
- Nwoko, E. Q. A.; Okeke, Iruka N.: Bacteria autoaggregation: how and why bacteria stick together. In: Biochemical Society transactions 49 (2021), S. 1147ff.
- Parent, M. E.; Snyder, C. E.; Kopp, N. D.; Velegol, D.: Localized quorum sensing in *Vibrio fischeri*. In: Colloids and surfaces. B, Biointerfaces 62 (2008), S. 180ff.
- Reynolds, C. W.: Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In: SIGGRAPH Comput. Graph. 21 (1987), S. 25–34.
- Richter, U. M.: Controlled self-organisation using learning classifier systems. Dissertation, Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB) 2009.
- Schlicksupp, H.: Kreative Ideenfindung in der Unternehmung. Methoden und Modelle. 1. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter 1977.
- Steghöfer, J.; Seebach, H.; Eberhardinger, B.; Reif, W.: PosoMAS: An Extensible, Modular SE Process for Open Self-organising Systems. In: Hoa K. D., Pitt J., Xu Y., Governatori G. und Ito T. (Hrsg.): PRIMA 2014: Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Bd. 8861. Springer International Publishing 2014, S. 1–17.
- Takens, F.: Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand D. und Young L.-S. (Hrsg.): Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980, Bd. 898. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1981, S. 366–381.
- Tomforde, S.; Prothmann, H.; Branke, J.; Hähner, J.; Mnif, M.: Observation and Control of Organic Systems. In: Müller-Schloer C., Schmeck H. und Ungerer T. (Hrsg.): Organic Computing A Paradigm Shift for Complex Systems. Basel: Springer Basel AG (Autonomic Systems, 1) 2011, S. 325–338.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Einsatz von Process-Mining zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen in Produktion und Logistik

Use of Process Mining to Verify and Validate Simulation Models in Production and Logistics

Felix Özkul, Robin Sutherland, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany), felix.oezkul@uni-kassel.de, robin.sutherland@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Sven Spieckermann, SimPlan AG, Hanau (Germany), sven.spieckermann@simplan.de

Abstract: Verification and validation (V&V) are imperative to ensure the success of a simulation study but are often insufficiently considered in practice due to the effort associated with V&V-activities. This contribution discusses the application of process mining techniques to check the validity of discrete event simulation models in production and logistics. For this purpose, we present a morphological box which highlights the scope of process mining in the context of V&V for simulation models and distinguishes between different V&V items, aspects of validity, and V&V-criteria. Subsequently, the paper describes how a real system can be related to the behaviour of a simulation model and presents two scenarios for process mining-supported V&V using a reference example.

1 Motivation

Der Einsatz der ereignisdiskreten Simulation ermöglicht die experimentelle Untersuchung komplexer Produktions- und Logistiksysteme unter Berücksichtigung ihres stochastischen Zeitverhaltens (Gutenschwager et al. 2017) und hat sich seit vielen Jahren branchenübergreifend bewährt (Wenzel und Peter 2013). Die erfolgreiche Anwendung der Simulation erfordert den Einsatz eines Simulationsvorgehensmodells mit verschiedenen Phasen (wie beispielsweise in Rabe et al. (2008) dargestellt), die von Aktivitäten zur Verifikation und Validierung (V&V) begleitet werden. Verifikation beschäftigt sich mit der Überprüfung der Korrektheit der erzeugten Modelle, verwendeten oder generierten Daten und der implementierten Software

(Balci 2003). Sie beurteilt, ob ein Phasenergebnis korrekt aus einem vorangegangenen Phasenergebnis transformiert wurde (Rabe et al. 2008). Bei der Validierung wird hingegen überprüft, ob ein Simulationsmodell das modellierte Systemverhalten mit einer hinreichenden Genauigkeit widerspiegelt und sichergestellt werden kann, dass das Simulationsmodell in Bezug auf ein definiertes Untersuchungsziel geeignet und damit glaubwürdig ist (Rabe et al. 2008). Für die Durchführung der V&V stehen verschiedene Techniken zur Verfügung; der vorliegende Beitrag untersucht Process-Mining als eine neue mögliche V&V-Technik für die ereignisdiskrete Simulation. Durch die Anwendung von Process-Mining-Techniken werden die Analyse und Gestaltung von Prozessen auf Basis operativer Daten, die in Form sogenannter Eventlogs vorliegen, ermöglicht (van der Aalst 2016). Die bekanntesten Techniken des Process-Minings sind die Prozessextraktion (*Process Discovery*), die (Prozess-)Konformitätskontrolle (*Conformance Checking*), Performance Analysen sowie die Prozessmodellerweiterung (van der Aalst 2016) (für weiterführende Techniken siehe van der Aalst (2022)) – die Techniken werden von Process-Mining-Werkzeugen in unterschiedlichen Umfängen unterstützt (für eine Übersicht kommerzieller Werkzeuge siehe Stierle et al. (2021)).

Dieser Beitrag beschreibt Anwendungsfelder für den Einsatz von Process-Mining – dabei vor allem Konformitätskontrolltechniken – zur V&V von ausführbaren Simulationsmodellen anhand von Szenarien. Hierzu wird zunächst eine wissenschaftliche Abgrenzung zu verwandten Forschungsrichtungen im Kontext der V&V vorgenommen (Kapitel 2), bevor der Anwendungsrahmen für die V&V auf Basis von Process-Mining in Kapitel 3 vorgestellt wird. In Kapitel 4 wird die Konformitätskontrolle als Basis für die Beurteilung der Simulationsmodellgültigkeit erläutert, in Kapitel 5 werden anschließend anhand eines Referenzsystems Szenarien für die V&V formuliert und diskutiert. Abgerundet wird der Beitrag durch ein Fazit und einen Ausblick (Kapitel 6).

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Neben Techniken und Vorgehensmodellen zur V&V existieren Forschungsansätze zur Beurteilung der Güte von V&V-Aktivitäten wie bspw. in Wang und Lehmann (2019), die auch das ausführbare Modell betreffen. Beim Einsatz von Process-Mining steht die Überprüfung des Prozessverhaltens im Vordergrund, wodurch sich erste Forschungsarbeiten zur V&V auf Basis von Process-Mining begründen lassen. So skizziert van der Aalst (2018) ein generisches Szenario, bei dem simulationsgenerierte Eventlogs als Analysegegenstand für Process-Mining-Techniken genutzt werden, und Jadrić et al. (2020) sprechen an, dass Process-Mining für V&V-Zwecke genutzt werden kann. Sitova und Pecerska (2019) demonstrieren eine fallstudienbezogene Anwendung von Process-Mining zur V&V eines Simulationsmodells aus der Transportlogistik, bei der simulierte Routen in exportierten künstlichen Eventlogs auf Grundlage der Ereignisliste des ausführbaren Simulationsmodells als Traces extrahiert und im Anschluss mithilfe von Process-Mining näher analysiert werden. Langer et al. (2021) und Özkul et al. (2022) beschreiben allgemein den interoperablen Einsatz von Process-Mining und ereignisdiskreter Simulation in Produktion und Logistik.

3 Anwendungsrahmen für den Einsatz von Process-Mining zur V&V ausführbarer Simulationsmodelle

V&V dienen dem Aufzeigen von Fehlern in Modellen oder in der Transformation von Phasenergebnissen und beziehen sich auf den Nachweis der Glaubwürdigkeit eines Modells (bzw. allgemeiner eines Phasenergebnisses in einer Simulationsstudie). Diese Tatsache ist auch Grundlage für die Anwendung von Process-Mining in dem hier beschriebenen Kontext, der sich auf die V&V von ausführbaren Simulationsmodellen als ein konkretes Phasenergebnis beschränkt. Für den Einsatz von Process-Mining lassen sich V&V-Gegenstände, unterschiedliche V&V-Aspekte der Gültigkeit und V&V-Kriterien mit unterschiedlichen Ausprägungen differenzieren. Abbildung 1 stellt den für den Einsatz von Process-Mining relevanten Anwendungsrahmen der V&V in Form eines morphologischen Kastens dar.

V&V-Gegenstände	Wirkstruktur		Prozesse			Strategien	
V&V-Aspekte der Gültigkeit	Strukturgültigkeit		Verhaltensgültigkeit			Empirische Gültigkeit	
V&V-Kriterien	Vollständigkeit	Konsistenz	Genauigkeit	Aktualität	Eignung	Plausibilität	Verständlichkeit

Abbildung 1: Morphologischer Kasten als Anwendungsrahmen für den Einsatz von Process-Mining zur V&V

Als V&V-Gegenstände auf Basis von Process-Mining können Prozesse, Strategien und die Wirkstrukturen zwischen den Modellelementen unterschieden werden.

Die zu überprüfenden Aspekte der Gültigkeit umfassen nach Bossel (2004) die Strukturgültigkeit, die Verhaltensgültigkeit, die empirische Gültigkeit sowie die Anwendungsgültigkeit. Die Strukturgültigkeit beschreibt die hinreichende Übereinstimmung eines Modells im Hinblick auf die Strukturbeziehungen des abgebildeten Systems, während die Verhaltensgültigkeit die qualitative Übereinstimmung des dynamischen Verhaltens zwischen Modell und System – bemessen an den Ein- und Ausgangsgrößen – ausdrückt. Die empirische Gültigkeit umfasst die Gültigkeit der Experimentierergebnisse des Modells im Hinblick auf damit verbundene Mess- und Experimentierwerte aus dem Untersuchungssystem. Alle drei Gültigkeitsaspekte lassen eine Anwendung des Process-Minings in Bezug auf die V&V-Gegenstände zu. Die Anwendungsgültigkeit überprüft das Simulationsmodell hinsichtlich des Modellzwecks und der Eignung für die Aufgabenstellung; derartige Überprüfungen sind mit Process-Mining nicht möglich – daher wird die Anwendungsgültigkeit nicht in den morphologischen Kasten aufgenommen.

Zur Beurteilung der Gültigkeit eines Simulationsmodells existieren zudem verschiedene V&V-Kriterien, die zur Sicherstellung der Korrektheit von Inhalt und Struktur, der Angemessenheit von Ergebnissen sowie zur Beurteilung der Durchführbarkeit dienen (Rabe et al. 2008). Mithilfe von Process-Mining können insbesondere Inhalt und Struktur der Simulationsmodelle und damit nach Rabe et al. (2008) Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit und Aktualität untersucht werden. Die Angemessenheit von Ergebnissen für die Anwendung wird mit den Kriterien Eignung, Plausibilität und Verständlichkeit bewertet und lässt ebenfalls eine Beurteilung durch Process-Mining zu. So können Plausibilität und Verständlichkeit durch ein mittels Process-Mining

extrahiertes semi-formales Prozessmodell verbessert werden und Grundlage für die Dokumentation des Simulationsmodells sein; die Eignung im Sinne einer Passgenauigkeit (siehe Rabe et al. 2008) wird durch die Beurteilung der Prozessmodellgüte mithilfe der genannten Konformitätstechniken sichergestellt. Die Durchführbarkeit hingegen bezieht sich eher auf die Beurteilung der Machbarkeit einer Simulationsstudie als Projekt und der Verfügbarkeit von beispielsweise Daten und Personal. Daher wird dieser Aspekt im morphologischen Kasten nicht näher betrachtet.

4 Gegenüberstellung von Untersuchungssystem- und Simulationsmodellverhalten mittels Konformitätskontrolle

Zur Umsetzung von V&V-Szenarien für Simulationsmodelle auf Basis von Process-Mining bilden Eventlogs und Prozessmodelle die Grundlage für den Vergleich zwischen dem Untersuchungssystem und dem Simulationsmodell. Abbildung 2 visualisiert diesen grundlegenden Zusammenhang.

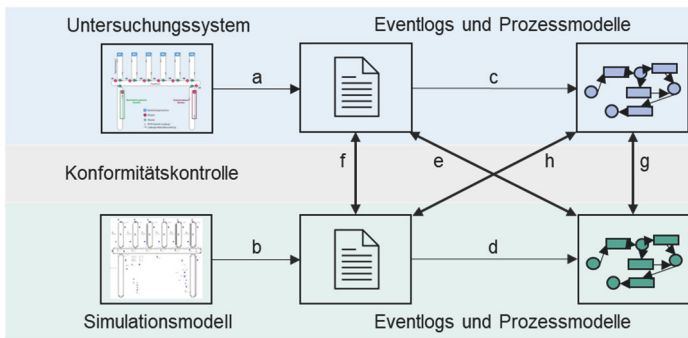


Abbildung 2: Relationen zwischen Untersuchungssystem und Simulationsmodell im Kontext der V&V auf Basis von Process-Mining

Die Abläufe im Untersuchungssystem und im Simulationsmodell werden mittels Eventlogs protokolliert (a und b), aus denen mithilfe von sogenannten Prozessextraktionsalgorithmen Prozessmodelle extrahiert werden können (c und d). Die Eventlogs und Prozessmodelle des Systems und des Simulationsmodells können im Rahmen von Konformitätskontrollen einander gegenübergestellt werden (e, f, g und h), um zu beurteilen, zu welchem Grad Eventlogs und Modelle übereinstimmen. Alle grau hinterlegten Relationen e bis h sind für die Konformitätskontrolle im Rahmen der V&V relevant, erfordern jedoch teils unterschiedliche Herangehensweisen, die sich hinsichtlich ihres Aufwands und ihrer Konformitätsbeurteilung unterscheiden. Hierbei bietet das Process-Mining Techniken und Qualitätsdimensionen zur Beurteilung der Konformität. Die wichtigste Kennzahl ist dabei die *Fitness*, die allgemein ein Maß für die Fähigkeit eines Prozessmodells ist, die in einem Eventlog protokollierten Aktivitätssequenzen (Traces) korrekt wiederzugeben (Carmona et al. 2018). Jedoch lässt sich diese Fitness ebenfalls zwischen zwei Prozessmodellen bewerten (g). Zur ganzheitlichen Beurteilung der Prozessmodellgüte existieren im Process-Mining darüber hinaus die Präzision, die Generalisierfähigkeit und die Einfachheit (Carmona et al.

2018) als Qualitätsdimensionen für Prozessmodelle, die jedoch für die V&V von Simulationsmodellen eine eher untergeordnete Rolle einnehmen, da im Rahmen der V&V der Nachweis der nicht hinreichenden Gültigkeit eines Simulationsmodells im Vordergrund steht (i. e., dass die Fitness zwischen Modell und System gering ist). Im Hinblick auf die V&V-Kriterien bilden sie jedoch die Grundlage für die Beurteilung der Simulationsmodellgültigkeit.

5 Szenarien für die Process-Mining-gestützte V&V

Da eine Beschreibung aller denkbaren Szenarien an dieser Stelle nicht möglich ist, werden jeweils ein Szenario zur V&V der Wirkstruktur (5.2) und zur V&V von Strategien (5.3) erläutert. Hierbei werden ebenfalls die Bezüge zu den Gültigkeitsaspekten und den V&V-Kriterien hergestellt. Zur besseren Verständlichkeit beziehen sich die Szenarien auf ein Referenzsystem, das nachfolgend kurz erläutert wird.

5.1 Referenzsystem für die V&V

Abbildung 3 stellt das Referenzsystem dieses Beitrags (ein vereinfachtes universitäres Laborsystem) schematisch dar. Ausgehend vom Bereitstellungsband (Quelle) werden mit fiktiven Objekten beladene Warenträger über ein Hauptband zum Entnahmeband (Senke) gefördert. Es existieren drei verschiedene Objekttypen (A, B, C) mit unterschiedlichen Bearbeitungsumfängen, die an den Maschinen (M1 bis M6) bearbeitet werden, bevor sie zum Entnahmeband gefördert werden. Objekttyp A passiert alle Maschinen in linearer Ordnung, Objekttyp B wird nur an M1, M2 & M3, und Objekttyp C nur an M4, M5 & M6 bearbeitet.

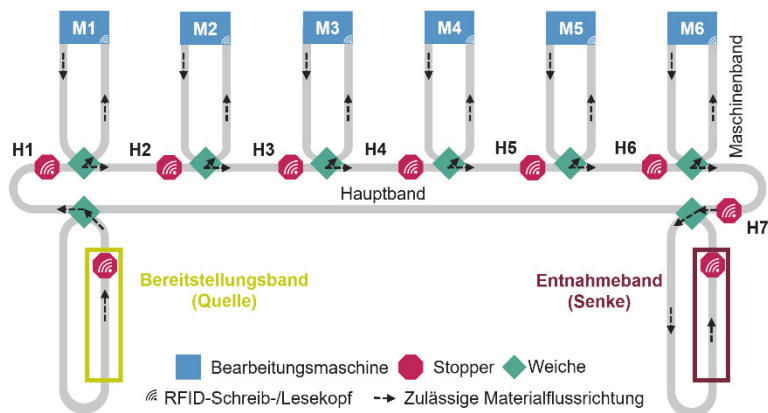


Abbildung 3: Schema des Referenzuntersuchungssystems

Ein Auftrag besteht immer aus einem Objekttyp. Die Warenträger sind mithilfe von RFID-Transpondern, die sich am Warenträger befinden, im System unterscheidbar und passieren an den gekennzeichneten Stellen (Quelle, Senke, Maschinen M1 – M6 und Positionen auf dem Hauptband H1 – H7) Schreib-/Lesegeräte, an denen die Warenträger gestoppt und ausgelesen werden. Zulässige Förderrichtungen zwischen

Quelle und Senke sind ebenfalls im Schema dargestellt. Beim Auslesen werden der aktuelle Lesevorgang (*Aktivität*) inklusive eines *Zeitstempels*, einer *Auftrags-ID* und der auf dem Warenträger geförderte auftragsspezifische Objekttyp (*ObjTyp*) in einem Eventlog gespeichert. Die Struktur des Eventlogs ist in Tabelle 1 dargestellt. Blau eingefärbt sind die Eventlog-Datendimensionen, die für die Anwendung von Process-Mining zwingend erforderlich sind (i. e. der Zeitstempel, der Auftragsidentifikator und die Bezeichnung der durch das Ereignis angestoßenen Aktivität).

Ressource (i. e. das aktivitätsausführende Systemelement) und *ObjTyp* beschreiben Ereignisse im Eventlog näher. Das Attribut *Ressource* stellt einen räumlichen Bezug zwischen Aktivität und System her; zwar weisen die Aktivitätsbezeichnungen im vorgestellten Referenzsystem einen direkten Bezug zur ausführenden Ressource auf, jedoch lässt sich dieser Bezug in der industriellen Anwendung nicht gewährleisten, weshalb ein Mapping zwischen der prozessorientierten und der strukturorientierten Systemsicht notwendig ist (Özkul et al. 2022). *ObjTyp* ist für die Analyse von Entscheidungspunkten und somit zur V&V von Steuerungen (siehe 5.3) relevant.

Tabelle 1: Auszug eines Eventlogs für das Referenzsystem

#	Zeitstempel	Auftrag	Aktivität	Ressource	ObjTyp
0	22-12-15 11:52:31	1	“log_an_Quelle“	Bereitstellungsband	A
1	22-12-15 11:52:41	2	“log_an_Quelle“	Bereitstellungsband	C
2	22-12-15 11:52:43	1	“log_an_H1“	H1	A
...
n	22-12-15 12:56:23	m	“log_an_Senke“	Entnahmeband	B

Abbildung 4 beschreibt das zugehörige Referenzsystemverhalten anhand eines Petri-Netzes (zu Petri-Netzen vgl. van der Aalst (2016)). Die konkrete Sequenz an Leseaktivitäten (Transitionen) eines Auftrags hängt vom geförderten Objekttyp ab; so tritt die Aktivität „log_an_M1“ nur dann auf, wenn der Objekttyp eines Auftrags nicht dem Typ C entspricht; Objekte vom Typ C überspringen „log_an_M1“ (das Überspringen ist dargestellt durch schwarz eingefärbte *Silent Transitions*).

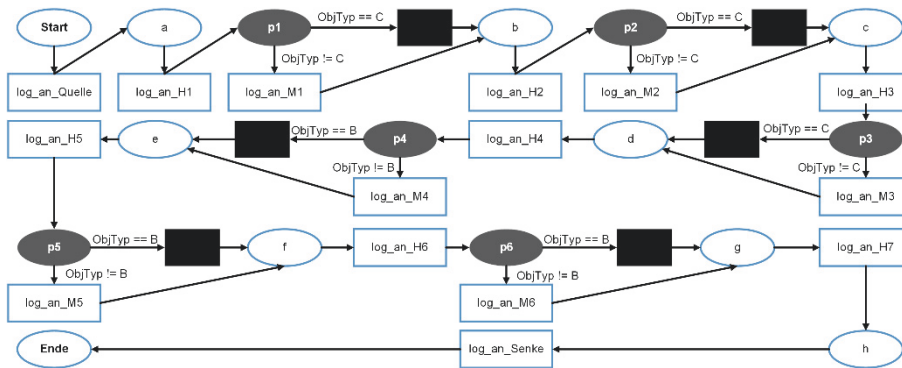


Abbildung 4: Petri-Netz zur Beschreibung des Referenzsystemverhaltens mit grau eingefärbten Entscheidungspunkten (gleich ==, ungleich !=)

5.2 V&V der Wirkstruktur

Zur Überprüfung der Wirkstruktur des Simulationsmodells hinsichtlich seiner Gültigkeit in Bezug auf das Referenzsystem (siehe 5.1) werden zunächst aus dem ausführbaren Simulationsmodell Eventlogs generiert, deren Datengranularität sich am Eventlog aus dem Untersuchungssystem in Tabelle 1 orientiert. Auf Grundlage des simulationsbasierten Eventlogs wird ein Prozessmodell extrahiert, dessen Konformität im Hinblick auf den systemseitig vorhandenen Eventlog untersucht wird (Die referenzierten Relationen sind a, b, d und e aus Abbildung 2). Die Strukturbeziehungen der Referenzsystemelemente stehen in direkter Beziehung zur Aktivitätsstruktur des Förderprozesses, da der Eventlog eine Aktivität und die ausführende Ressource auf der Ereignisebene protokolliert (siehe Tabelle 1). Zunächst wird die Konformitätskontrolle auf Basis von Footprints (Näheres in Carmona et al. (2008)) durchgeführt und ein Fitnesswert wird für das simulationsbasierte Prozessmodell ermittelt. Werden Warenträger darin zunächst an M6 ausgelesen, bevor sie an M5 ausgelesen werden, so ist die tatsächliche Nachfolgebeziehung verletzt und die Footprint-basierte Fitness verringert sich (die Konsistenz und Plausibilität des Simulationsmodells sind somit nicht gegeben). Gleiches gilt für fehlende Aktivitäten im Prozessmodell (i. e. das Modell ist unvollständig und ungenau). Unterschreitet der Fitnesswert eine Untergrenze (abhängig von der Anwendung und Konformitätskontrolltechnik), so ist die Gültigkeit des Modells nicht gegeben. Liegt der Fitnesswert nach dem Footprint-Vergleich knapp über der Untergrenze, können ggf. aufwendigere Techniken zur Beurteilung der Fitness wie Token Replay oder Alignments eingesetzt werden.

Die Ursachen für eine nicht hinreichende Gültigkeit können durch dieses Vorgehen jedoch nicht benannt werden (Alignments können jedoch als Grundlage für weiterführende Diagnosen genutzt werden (van der Aalst 2016)). So ist es möglich, dass bspw. die Prozessnebenläufigkeit an den Entscheidungspunkten p1-p3 (in Abbildung 4) dadurch missachtet wird, dass entweder an den Verzweigungen im Simulationsmodell keine geeignete objekttypdifferenzierende Logik implementiert ist oder dass die Informationen in den Eventlogs in einem Zeitraum erhoben wurden, in dem keine Objekte vom Typ C durch das Referenzsystem gefördert wurden (i. e. die Aktualität der Daten ist nicht gegeben). Bezogen auf den in Abbildung 1 dargestellten morphologischen Kasten können primär Aussagen bezüglich der Strukturgültigkeit im Hinblick auf die V&V-Kriterien getroffen werden, die sich an der Wirkstruktur der Aktivitäten im Hinblick auf die Fitness des simulationsbasierten Prozessmodells bemessen.

5.3 V&V von Strategien

Im zweiten Szenario wird das Process-Mining genutzt, um Strategien in Simulationsmodellen anhand lokaler Entscheidungspunkte zu untersuchen und im Hinblick auf die Ursachen, die zu Entscheidungen führen, Anhaltspunkte zu bieten. So können V&V-Kriterien wie Plausibilität und Konsistenz von Strategien beurteilt werden. Die methodische Grundlage hierfür sind Entscheidungspunktanalysen sowie das weiterführende Decision-Mining. Die üblichen Prozessmodelle des Process-Minings (wie bspw. Petri-Netze) beschreiben den Kontrollfluss der Aktivitätsausführung eines Prozesses; Decision-Mining erweitert diese Sichtweise, indem Ursachen für Entscheidungen anhand von Daten in Eventlogs ermittelt werden (Näheres in de Leonie und van

der Aalst (2013)). Diese Entscheidungspunkte sind in Prozessmodellen als Bereiche erkennbar, in denen ausschließlich eine von mehreren möglichen Aktivitäten ausgeführt werden kann. In Abbildung 4 sind die relevanten Entscheidungspunkte im Referenzsystem grau eingefärbt (p1 bis p6).

Auf Grundlage des Eventlogs in Tabelle 1 kann mithilfe von Prozessextraktionsalgorithmen zunächst ein Petri-Netz entdeckt (vgl. Abbildung 4) und Entscheidungspunkte können anhand der genannten syntaktischen Eigenschaften im Modell identifiziert werden. Die Entscheidungspunkte können (sofern das Prozessmodell eine hinreichende Fitness aufweist) im Anschluss mithilfe von klassifizierenden Verfahren auf Basis der Informationen im Eventlog untersucht werden. So ist es möglich, die diskreten Nachfolgerrelationen an einem Entscheidungspunkt zu enumerieren, zu codieren (bspw. durch *One-Hot-Encoding*) und mithilfe von maschinellen Lernverfahren (ML) zu prognostizieren (i. e. den Sequenzfluss an einem Entscheidungspunkt vorauszusagen). Hierfür relevant ist die Eventlogdimension *ObjTyp*, die als Eingangsdatum für das Training eines klassifizierenden Algorithmus dient. Am Entscheidungspunkt p1 wird die nachfolgende Transition „log_an_M1“ nur dann geschaltet, wenn der aktuelle Auftrag nicht vom Typ C ist (i. e. nur Objekte vom Typ A oder B werden zu M1 gefördert). Die ermittelten logischen Ausdrücke am Entscheidungspunkt p1 ($ObjTyp \neq C$ bzw. sein Komplement $ObjTyp = C$) sind das Ergebnis der Entscheidungspunktanalyse, das als Ausgangspunkt für die Beurteilung der Gültigkeit einer implementierten Strategie in einem Simulationsmodell in Bezug auf einen Entscheidungspunkt dienen kann. So ist es möglich, die implementierte Entscheidungslogik einer Verzweigung entweder direkt anhand des Simulationsmodells oder indirekt anhand simulationsgenerierter Eventlogs dem Untersuchungssystemverhalten gegenüberzustellen.

Voraussetzungen für das beschriebene Szenario sind ein hinreichend semantisiertes Eventlog, das die relevanten Datendimensionen für das ML bereitstellt, sowie hinreichendes Domänenwissen zur Identifikation, Auswahl und ggf. Transformation relevanter Eingangsdaten.

In den etablierten Techniken der V&V knüpft der hier vorgestellte Ansatz an den Einsatz von Ursache-Wirkungs-Graphen an, in denen Ursachen als binäre Größen dargestellt (Rabe et al. 2008) und in Relation zu Aktionen gesetzt werden. Auf Grundlage der durch Decision-Mining ermittelten booleschen Ausdrücke an den Entscheidungspunkten (siehe Abbildung 4) kann eine Entscheidungstabelle, wie in Tabelle 2 durch Pseudocode dargestellt, generiert und zur Überprüfung der implementierten Simulationsmodelllogik genutzt werden. Hierbei kann die Überprüfung beispielsweise durch den Vergleich zweier Entscheidungstabellen (einer simulationsgenerierten und einer realsystembasierten) oder durch eine Reflexion im Rahmen eines Turing-Tests mit Experten (Näheres in Rabe et al. 2008) im Hinblick auf die V&V-Kriterien (siehe Kapitel 3) stattfinden. Aufgrund des Umfangs der Entscheidungstabelle ist dieses Szenario jedoch eher als Test für Teilmodelle aufzufassen.

Tabelle 2: Durch Decision-Mining ermittelte Entscheidungstabelle für Entscheidungspunkte im Referenzsystem ($j = ja, n = nein$)

Bedingungen												
p1.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	j	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p2.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	-	-	j	n	-	-	-	-	-	-	-	-
p3.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	-	-	-	-	j	n	-	-	-	-	-	-
p4.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	j	n	-	-	-	-
p5.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	-	-	j	n	-	-
p6.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	j	n
Aktionen												
aktuellerAuftrag.moveto(M1)		x										
aktuellerAuftrag.moveto(M2)				x								
aktuellerAuftrag.moveto(M3)						x						
aktuellerAuftrag.moveto(M4)									x			
aktuellerAuftrag.moveto(M5)											x	
aktuellerAuftrag.moveto(M6)												x
SKIP	x		x		x		x		x		x	

6 Fazit und Ausblick

Der Beitrag ist ein Einstieg in die Anwendung von Process-Mining als V&V-Technik für die Simulation. Er erläutert – ausgehend von einem allgemeinen Anwendungsrahmen, dessen Potenziale durch zukünftige Forschungsvorhaben vertiefend ermittelt werden müssen, – zwei Anwendungsszenarien am Beispiel eines Referenzsystems und verdeutlicht, wie das Untersuchungssystem- mit dem Simulationsmodellverhalten auf Grundlage von Konformitätskontrolltechniken gegenübergestellt werden kann, um so Aussagen hinsichtlich der Modellgültigkeit treffen zu können. Allerdings stellen die diskutierten Process-Mining-Techniken lediglich einen Ausgangspunkt für die Anwendung weiterführender Diagnose- und Ursachenermittlungstechniken dar, die zukünftig dazu dienen können, nicht nur die Gültigkeit eines Simulationsmodells zu beurteilen, sondern im Falle der nicht hinreichenden Gültigkeit auch die Ursachen auf Grundlage der operativen Daten in Eventlogs zu benennen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „SimProve – Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining zur effizienteren Analyse und Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen“, das durch Mittel des Landes Hessen im Rahmen des Distr@l-Programms gefördert und von September 2021 bis September 2023 unter Konsortialführerschaft der SimPlan AG durchgeführt wird.

Literatur

- Balci, O.: Validation, Verification, and Certification of Modeling and Simulation Applications. In: Chick, S.; Sanchez, P.J.; Ferrin, E.; Morrice, D.J. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans (USA), 7.-10. Dezember 2003, S. 150-158.
- Bossel, H.: Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand 2004.

- Carmona, J.; van Dongen, B.; Solti, A.; Weidlich, M.: *Conformance Checking: Relating Processes and Models*. Cham: Springer International Publishing 2018.
- de Leoni, M.; van der Aalst, W.M.P.: *Data-aware Process Mining: Discovering Decisions in Processes Using Alignments*. In: Shin, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, Coimbra (Portugal)*, 18.-22. März 2013, S. 1454-1461.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017.
- Jadrić, M.; Pašalić, I.N.; Čukušić, M.: *Process Mining Contributions to Discrete-event Simulation Modelling*. *Business Systems Research Journal* 11 (2020) 2, S. 51-72.
- Langer, A.; Ortmeier, C.; Martin, N.L.; Abraham, T.; Herrmann, C.: *Combining Process Mining And Simulation In Production Planning*. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021)*, Hannover, 2021, S. 264-273.
- Özkul, F.; Sutherland, R.; Wenzel, S.; Jessen, U.; Spieckermann, S.: *Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining in Produktion und Logistik*. In: Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): *ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge*, Wien (Austria), 25.-27. Juli 2022, S. 39-48.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Sitova, I.; Pecerska, J.: *Process Mining Techniques in Simulation Model Adequacy Assessment*. In: Grabis, J.; Romanovs, A.; Kuleshova, G. (Hrsg.): *60th International Scientific Conference on Information Science of Riga Technical University (ITMS)*, Riga (Latvia), 10.-11. Oktober 2019, S. 1-4.
- Stierle, M.; Viner, D.; Matzner, M.: *FAU 2021 Process Mining Survey*. Erlangen-Nürnberg: FAU University Press; 2021. Online verfügbar unter https://www.processmining-software.com/wp-content/uploads/2021/FAU2021-Process_Mining_Survey.pdf, letzter Zugriff 29.06.2023.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process mining: Data science in action*. Berlin, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2016.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process mining and simulation: a match made in heaven!* In: Padilla, J.J.; Lynch, C.J. (Hrsg.): *Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2018)*, Bordeaux (France), 9.-12. Juli 2018, S. 1-12.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process Mining: A 360 Degree Overview*. In: van der Aalst, W.M.P.; Carmona, J. (Hrsg.): *Process mining handbook*. Cham: Springer 2022, S. 3-34.
- Wang, Z.; Lehmann, A.: *A Generic Maturity Model for Verification and Validation of Modeling and Simulation Applications*. In: Tan, G.; Lehmann, A.; Teo, Y.; Cai, W. (Hrsg.): *Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems – 19th Asia Simulation Conference (AsiaSim)*, Singapore, 30. Oktober - 1. November 2019, S. 65-76.
- Wenzel, S.; Peter, T.: *Simulation zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit – Ergebnisse einer Umfrage zur Simulation in Produktion und Logistik*. In: Friedewald, A. (Hrsg.): *Produzieren in Deutschland – Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert*. Berlin: Gito 2013, S. 243-264.

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Automatisierungspotenzial von Verifikations- und Validierungstechniken in der ereignisdiskreten Simulation

Automation Potential of Verification and Validation Techniques in Discrete Event Simulation

Katharina Langenbach, Anne Antonia Scheidler, Markus Rabe
TU Dortmund, Dortmund (Germany), katharina.langenbach@tu-dortmund.de,
anne-antonia.scheidler@tu-dortmund.de, markus.rabe@tu-dortmund.de

Abstract: Simulation is a proven method in industry and research to provide the basis for further decisions. Therefore, the credibility of its results is of major importance. Generally, simulation studies are guided by procedure models comprised of several phases with specific results. To assess the credibility, verification and validation (V&V) is used by applying V&V techniques to these phase results, which requires significant effort. One possibility to reduce this effort and support simulation users is to automate V&V. For this purpose, the notions of automation must be transferred to the domain of V&V in order to assess the automatability of V&V techniques. The effort for the application of V&V techniques can be reduced while maintaining or increasing the credibility of simulation.

1 Einleitung

In Anwendungsfeldern der Produktion und Logistik ist die ereignisdiskrete Simulation von besonderer Bedeutung. Hierbei ist die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse von besonderer Wichtigkeit, da diese für nachgelagerte Entscheidungen verwendet werden. Um diese Glaubwürdigkeit zu gewährleisten, wird eine integrierte, phasenübergreifende Verifikation und Validierung (V&V) benötigt, wie im VDI-Vorgehensmodell (VDI 2014) beschrieben. Wird die V&V in einem Maße angewendet, wie es durch das VDI-Vorgehensmodell gefordert wird, ist die Durchführung der V&V als komplex und zeitintensiv zu bewerten. Dies bedeutet im Regelfall, dass eine ausreichend umfangreiche V&V in Simulationsstudien ein hohes Expertenwissen sowie einen großen Zeitaufwand und somit hohe Kosten bedingt (Wishart et al. 2020).

Um die Anwender von Simulationsstudien in der Umsetzung einzelner Phasen von Vorgehensmodellen zu unterstützen, existieren Tools, wie sie beispielsweise im Verbundvorhaben EDASim entwickelt wurden (Bogon et al. 2012). EDASim legt einen

Schwerpunkt auf die Unterstützung bei der Auswahl, der Validierung sowie der Vorbereitung von Inputdaten und auf die Auswertung von Outputdaten der Simulation. Eine darüberhinausgehende Unterstützung der V&V während einer gesamten Simulationsstudie ist wünschenswert. Dabei sollte die Automatisierbarkeit von V&V-Techniken als Kriterium der Auswahl betrachtet werden, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass Simulationsnutzer nicht zwangsläufig über das Wissen von Simulationsexperten verfügen (Bergmann 2014). Jedoch finden sich in der Literatur nur wenige Aussagen über die Automatisierbarkeit von V&V-Techniken in der Simulation. Zielführende Ansätze zur Einschätzung der Automatisierbarkeit werden anschaulich in Bergmann (2014) in Tabellenform dargestellt. In Bergmann und Strassburger (2010) wird der Bedarf automatischer Validierung ebenfalls aufgezeigt. Allerdings sind in der gängigen Literatur keine konkreten Kriterien bekannt, die einen generischen Ansatz zur Bewertung von V&V-Techniken bezüglich ihrer Automatisierbarkeit bieten. In diesem Zusammenhang konnten die Autoren feststellen, dass sich Beispiele für Innovationstreiber im Bereich der automatisierten V&V in der Telekommunikationsbranche finden (vgl. Peuster et al. 2019).

Durch eine automatisierte Durchführung von V&V-Techniken kann auch bei einer komplexen Datenbasis Zeit eingespart sowie das Vertrauen in die Ergebnisse einer Simulation und damit in die darauf basierenden Entscheidungen erhöht werden. Allerdings können nicht alle V&V-Techniken in gleichem Maße automatisiert werden. Daher ist eine Systematik erforderlich, um das Automatisierungspotenzial von V&V-Techniken zu bewerten.

2 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden Simulation, V&V und Automatisierung sowie deren Nutzung kurz erläutert mit dem Ziel, den Ausgangspunkt für einen ersten Ansatz zur Bewertung der Automatisierbarkeit von V&V-Techniken zu bestimmen.

2.1 Simulation

Simulation ist sowohl in der Industrie als auch in der Forschung eine weit verbreitete Methode zur Analyse, Vorhersage oder Entscheidungsunterstützung (vgl. Banks 1998; Fleischmann et al. 2015; Kleijnen 2005; Kuhn und Wenzel 2008; Law 2015). Für weitere Anwendungsfälle sei auf die Fallbeispielsammlungen von Kuhn und Rabe (1998) sowie Rabe und Hellingrath (2001) sowie auf die Tagungsbände der ASIM Fachtagungen (ASIM 2023) verwiesen. In diesem Zusammenhang werden in der Simulation Systeme untersucht, die entweder bereits in der betrachteten Form existieren oder nur Entwürfe sind (Law 2015). Nach DIN 60050-351 (2013, S. 21) ist ein System definiert als eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“. Zur Untersuchung komplexer Systeme ist es erforderlich, diese in Form von Modellen darzustellen, die eine vereinfachte Darstellung der realen Welt sind (Banks 1998). Um mit Hilfe von Modellen Lösungen zu finden, kann Simulation eingesetzt werden, insbesondere wenn analytische Lösungen nicht möglich sind oder zu viel Zeit in Anspruch nehmen würden (van der Valk et al. 2022). In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen für den Begriff Simulation (Banks 1998; Law 2015). Im Folgenden wird die Definition der VDI 3633 für Simulation verwendet: „Nachbilden eines Systems mit seinen

dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“ (VDI 2014, S.3).

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Simulation zur Untersuchung bestimmter Fragestellungen eingesetzt wird, beispielsweise organisiert als Simulationsstudien. Die Durchführung von Simulationsstudien erfordert jedoch aufgrund der zugrunde liegenden Komplexität ein strukturiertes Vorgehen. Hierfür können Vorgehensmodelle verwendet werden. Zu den publizierten Vorgehensmodellen zählen das von Sargent (2013) vorgestellte Vorgehensmodell, das von Balci (1998) vorgeschlagene Modell sowie das vom VDI (2014) empfohlene Vorgehensmodell. Bei der Verwendung von Vorgehensmodellen ist der jeweilige Zweck und Anwendungsbereich zu berücksichtigen. In dem im deutschsprachigen Raum weit verbreiteten Vorgehensmodell für Simulationsstudien von Rabe et al. (2008), das in die Richtlinie VDI 3633 übernommen wurde, wird die V&V besonders betont.

2.2 Verifikation und Validierung

V&V spielt sowohl bei der Modellierung als auch bei der Simulation und somit auch bei der Durchführung von Simulationsstudien eine entscheidende Rolle, da sie die Glaubwürdigkeit der erzielten Ergebnisse erhöht (Balci 1998). Weitere Qualitätsattribute für die Glaubwürdigkeit, die insbesondere für die Simulationssoftware in Betracht gezogen werden, sind Sicherheit, Effizienz und Kompatibilität (Kumar und Syed 2011). Bei der Verifikation wird überprüft, ob ein Modell korrekt gebildet wurde. Unter „korrekter Bildung“ wird verstanden, dass die Genauigkeit der Darstellung des Systems durch das Modell erhalten bleibt, wenn das Modell von einer Form in eine andere übertragen wird (Allen et al. 2005). Bei der Validierung wird untersucht, ob das richtige Modell gebildet wurde (Rabe et al. 2008). Im Sinne der Zweckbindung bedeutet „richtig“ hier, dass das untersuchte System basierend auf den definierten Anforderungen ausreichend gut approximiert wird (Allen et al. 2005). Die Aufgabenstellung von V&V macht deutlich, dass diese keine einmalige Handlung ist, sondern kontinuierlich während der gesamten Simulationsstudie durchgeführt werden muss (vgl. Brade 2000; Sargent und Balci 2017; Wenzel et al. 2008).

Zur Anwendung von V&V werden die Phasenergebnisse gemäß dem verwendeten Vorgehensmodell mit Hilfe von V&V-Techniken untersucht (Rabe et al. 2008). Umfassende Übersichten über V&V-Techniken finden sich in Balci (1998), Rabe et al. (2008) und Roungas et al. (2018). Die Autoren klassifizieren V&V-Techniken auch anhand ihrer Merkmale. Balci (1998) unterscheidet die vier Kategorien formal, informell, statisch und dynamisch, während Rabe et al. (2008) V&V-Techniken nach ihrem Grad an Objektivität bewerten. Außerdem betonen sowohl Balci als auch Rabe et al., dass nicht jede V&V-Technik in jeder Phase einer Simulationsstudie anwendbar ist und geben an, welche V&V-Techniken in welcher Phase ihres jeweiligen Vorgehensmodells eingesetzt werden können.

Wird das von Rabe et al. (2008) entwickelte Vorgehensmodell betrachtet, das in die Richtlinien der VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik aufgenommen wurde (VDI 2014), so sind zwei Stränge identifizierbar. Diese können als Stränge der Modellentwicklung und der Datenbereitstellung beschrieben werden. Weiterhin wird für jede Phase ein explizites Phasenergebnis genannt, so dass eine direkte Integration von V&V in das Vorgehensmodell möglich ist. Darüber hinaus wird der kontinuierliche

Charakter der V&V deutlich, da es keine separaten Phasen für V&V gibt. Stattdessen ist V&V entlang der gesamten Simulationsstudie durchzuführen. Dabei werden alle Typen von Phasenergebnissen in der V&V geprüft. So werden beispielsweise die Rohdaten, das Konzeptmodell sowie die Simulationsergebnisse untersucht. Jedes Phasenergebnis muss erfolgreich verifiziert und validiert werden, bevor mit der nächsten Phase fortgefahren werden kann. Dies führt zu einem iterativen Charakter der Entwicklung und der Durchführung der Simulation, bei dem Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden können.

2.3 Automatisierung

Automatisierung findet in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen statt, etwa bei der Prozessautomatisierung (Chakraborti et al. 2020), der Steuerung von Fertigungsprozessen (Frohm et al. 2008) oder bei automatisierten Testfällen in der Softwareentwicklung (Asfaw 2015). Automatisierung kann in Kombination mit physischen Systemen, aber auch ohne diese stattfinden. Der Begriff Automatik bezieht sich auf „einen Prozess oder eine Einrichtung [...], der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“ (DIN 2013, S. 30). Durch die Einbeziehung von Prozessen in die Begriffsdefinition wird deutlich, dass diese auch auf den Prozess der V&V anwendbar ist und somit die Vorteile der Automatisierung genutzt werden können. Der Begriff Automatisierung ist nicht binär, sondern als ein Kontinuum zu verstehen. Somit sind Abstufungen zwischen ganz fehlender und vollständiger Automatisierung möglich. Beispiele für solche Abstufungen finden sich in der Übersichtsarbeit von Frohm et al. (2008). Die Gemeinsamkeit der unterschiedlichen Abstufungen der Automatisierung ist, dass sie die Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Computer in Automatisierungsgrade einteilen. Unterschieden wird zwischen Aufgabenbereichen, die nur von Menschen, nur von Computern oder von beiden zusammen bearbeitet werden. Endsley und Kaber (1999) unterscheiden die vier Bereiche Überwachung, Generierung, Selektion und Implementierung, während Sheridan (1980) zwischen den drei Bereichen Ausführung, Analyse und Entscheidung differenziert. In den einzelnen Aufgabenbereichen können Überschneidungen festgestellt werden. Für die Anwendung der Automatisierung in der V&V ist die Einteilung nach Sheridan (1980) sinnvoll, da V&V-Techniken durchgeführt werden müssen, der resultierende Input analysiert und darauf aufbauend eine Entscheidung getroffen werden muss.

3 Ableitung des Automatisierungspotentials von Verifikations- und Validierungstechniken

Um das Automatisierungspotenzial von V&V-Techniken beurteilen zu können, ist zunächst eine einheitliche Betrachtung unterschiedlicher V&V-Techniken erforderlich. Eine V&V-Technik kann als Blackbox betrachtet werden, unabhängig von ihrer konkreten Umsetzung. Dabei werden in der Blackbox Phasenergebnisse als Input unter Zuhilfenahme weiteren V&V-Technik-spezifischen Inputs nach den Regeln der jeweiligen V&V-Technik verarbeitet. Auf diese Weise wird eine Bewertung durch die V&V-Technik als Output erzeugt, die aussagt, ob die Validierung oder Verifikation der betrachteten Phase mit der gewählten V&V-Technik erfolgreich war. Die betrachteten Phasenergebnisse stammen aus der Anwendung des verwendeten Vorgehensmodells.

Um das Automatisierungspotential von V&V-Techniken einschätzen zu können, sind zunächst Prinzipien der Automatisierung auf den Anwendungsbereich der V&V zu übertragen. Dabei bietet sich der in Abschnitt 2 beschriebene Ansatz nach Sheridan (1980) an. Die drei durch Sheridan betrachteten Bereiche Ausführung, Analyse und Entscheidung entsprechen in der Anwendung von V&V-Techniken der Verarbeitung der Inputs, der Analyse der durch die Verarbeitung erzeugten Ergebnisse und einer Entscheidung basierend auf dieser Analyse, ob die V&V für das entsprechende Phasenergebnis mit der verwendeten V&V-Technik erfolgreich war. Dabei übernimmt der Computer mit zunehmender Automatisierung einen immer größeren Anteil der Aufgaben aus den genannten Bereichen.

Durch das Potential der automatischen Verarbeitbarkeit von Phasenergebnissen wird das Automatisierungspotential von V&V-Techniken eingeschränkt. Dies lässt sich primär auf den Formalisierungsgrad der betrachteten Phasenergebnisse zurückführen. Je höher der Formalisierungsgrad eines Phasenergebnisses, desto besser lässt es sich automatisch verarbeiten. Werden diese Überlegungen mit dem Vorgehensmodell für Simulationsstudien des VDI kombiniert, ergibt sich als erste Einschätzung der Automatisierbarkeit der V&V-Techniken für einzelne Phasenergebnisse der in Abbildung 1 dargestellte Zusammenhang.

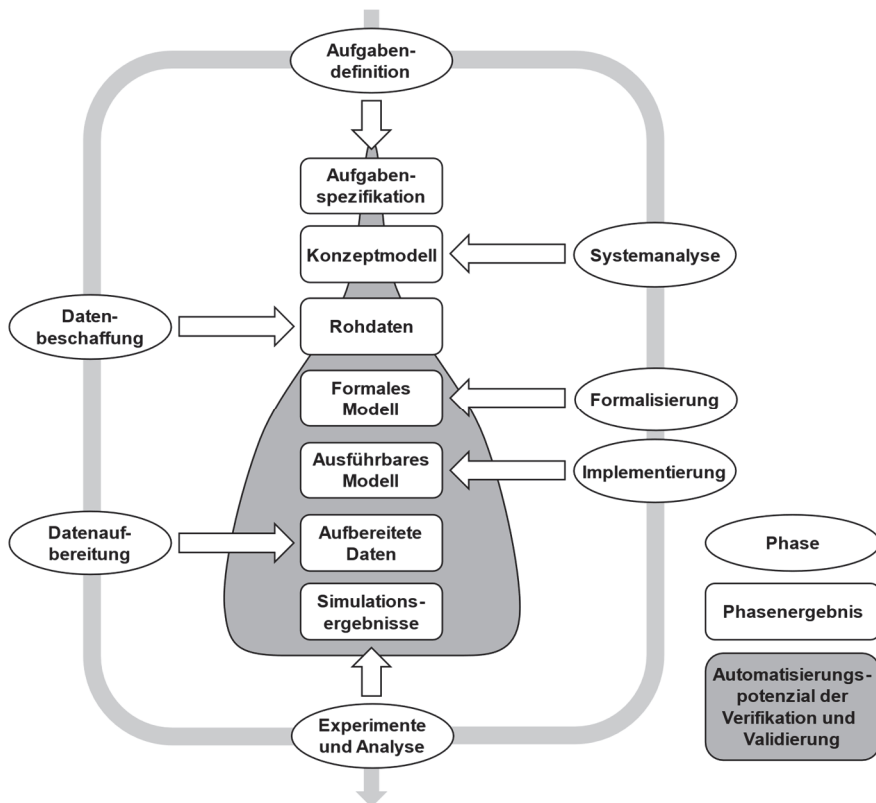


Abbildung 1: Automatisierungspotenzial der V&V von Phasenergebnissen aufbauend auf dem VDI-Vorgehensmodell für Simulationsstudien (VDI 2014)

Eine zusätzliche Limitierung des Automatisierungspotentials von V&V-Techniken ergibt sich durch den Grad der Subjektivität einzelner V&V-Techniken. Dieser kann auf die Art des zusätzlich benötigten V&V-Technik-spezifischen Inputs zurückgeführt werden. So erfordern V&V-Techniken, die als subjektiv eingeordnet werden, häufig die Einschätzung von Experten, um eine Bewertung des Phasenergebnisses vornehmen zu können. Das Einbringen dieser Art von Wissen und Erfahrung ist durch den Computer nicht möglich. Somit ist das Automatisierungspotential einer V&V-Technik umso geringer, je höher der Grad der Subjektivität ist.

Durch die Zusammenführung der zwei Kriterien *Formalisierungsgrad des betrachteten Phasenergebnisses* und *Subjektivitätsgrad der angewendeten V&V-Technik* ist eine erste Einschätzung ihrer Automatisierbarkeit möglich. In Tabelle 1 ist eine entsprechende Bewertung von V&V-Techniken aufgeführt, deren Einschätzung auf der langjährigen Erfahrung der Autoren und der Vorarbeit von Langenbach (2023) beruht. Dabei werden etablierte Techniken basierend auf Rabe et al. (2008) betrachtet. Die Tabelle 1 kann als Hilfe für Anwender von Simulation verstanden werden, um V&V-Techniken mit möglichst hohem Automatisierungspotential wählen zu können.

Um die Einschätzungen der Automatisierbarkeit von V&V-Techniken zu überprüfen, wurden exemplarisch die Validierung im Dialog und die Validierung von Vorhersagen in einem Fallbeispiel in Zusammenarbeit mit einem Experten angewendet. Diese zwei V&V-Techniken wurden gewählt, da sie zu den etablierten und häufig genutzten zählen und über unterschiedliche Charakteristika verfügen (Rabe et al. 2008). Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Anwendungen. In der betrachteten Simulationsstudie wurde ein erweitertes SEIR-Modell für die Modellierung von Inzidenzen des SARS-CoV-2-Ausbruchs im Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen, Deutschland) verwendet. Dabei wurden als zu validierendes Phasenergebnis die Simulationsergebnisse gewählt (siehe Abbildung 2), da diese für beide Validierungstechniken geeignet sind.

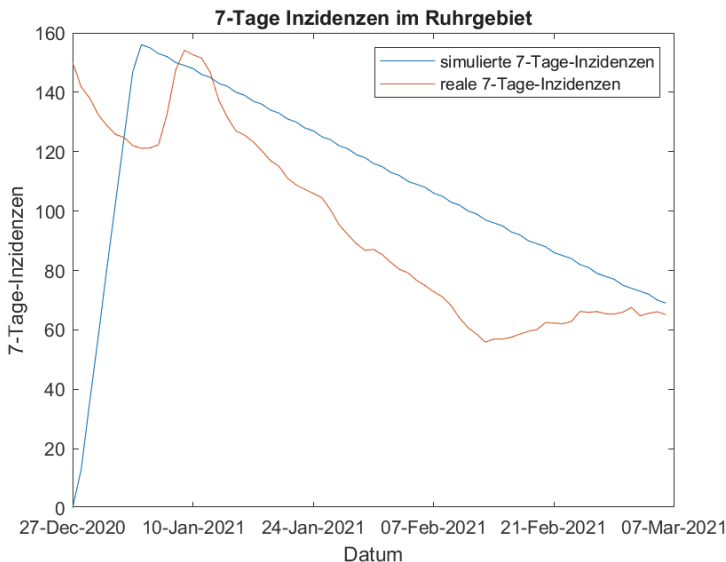


Abbildung 2: Entwicklung der 7-Tage-Inzidenzen im Ruhrgebiet

Tabelle 1: Einschätzung der Automatisierbarkeit von einer Auswahl V&V-Techniken basierend auf dem betrachteten Phasenergebnis und dem Grad der Subjektivität der V&V-Technik nach Rabe et al. (2008)

V&V-Technik	Ziel- beschreibung	Aufgaben- spezifikation	Konzeptmodell	Formales Modell	Ausführbares Modell	Simulations- ergebnisse	Rohdaten	Aufbereitete Daten	Grad der Subjektivität
Animation					-	-			1
Begutachtung	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Dimensionstest				+	+	+	o	+	4-5
Ereignisvaliditätstest					+				4-5
Fest-/Grenzwertest				o	o	o			3-4
Monitoring					o	o		o	1-3
Schreibtischtest	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Sensitivitätsanalyse					o	o		o	2-4
Statistische Techniken					+	+	o	+	4-5
Strukturiertes Durchgehen	-	-	-	-	-	-	-	-	1-2
Test der internen Validität					+	+			4-5
Test von Teilmodellen			-	-	-				1-2
Trace-Analyse					o				1-3
Turing-Test					o			o	2-3
Ursache-Wirkungs- Graph			-	o	o				3-4
Validierung im Dialog	-	-	-	-	-	-	-	-	1-2
Validierung von Vorhersagen					+				3-4
Vergleich mit anderen Modellen					o	o			2-4
Vergleich mit auf- gezeichneten Daten					+				3-5

Legende: Automatisierungspotenzial: + (hoch), o (mittel), - (gering)
Grad der Subjektivität: 1 (hoch), 5 (gering)

Die Bewertung der Automatisierbarkeit der beiden Validierungstechniken erfolgt mit Hilfe von Tabelle 1. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Validierung im Dialog geringes und die Validierung von Vorhersagen hohes Automatisierungspotenzial aufweisen. Diese Einschätzungen werden durch eine konkrete Umsetzung der betrachteten Validierungstechniken in einer möglichst automatisierten Form bestätigt. Durch den kommunikativen Charakter der Umsetzung der Validierung im Dialog ist eine Automatisierung nicht möglich, während die Validierung von Vorhersagen zu einem großen Teil auf einem Vergleich von Daten beruht. Ein solcher Vergleich birgt wieder-

rum hohes Automatisierungspotential. Für detailliertere Erläuterungen des Fallbeispiels und der konkreten Umsetzung der Validierung der Simulationsergebnisse sowie weiteren Ausführungen zur Bewertung von V&V-Techniken wird auf Langenbach (2023) verwiesen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein erster Ansatz zur Bewertung von V&V-Techniken im Hinblick auf ihre Automatisierbarkeit vorgestellt. Zu diesem Zweck wurden die Grundlagen der Simulation und V&V sowie der Automatisierung kurz diskutiert. Weiter wurde das Konzept der Automatisierung auf den Bereich der V&V übertragen. Basierend darauf und auf der Betrachtung von V&V-Techniken als Blackbox wurden Ansatzpunkte für die Bewertung der Automatisierbarkeit von V&V-Techniken aufgezeigt. So können V&V-Techniken in Relation zu den betrachteten Phasenergebnissen sowie der Einschätzung ihrer Subjektivität einem hohen, mittleren oder geringen Automatisierungspotential zugeordnet werden. Eine Übersicht bewerteter etablierter V&V-Techniken wurde in Form von Tabelle 1 bereitgestellt. Die Einschätzungen der V&V-Techniken wurden durch eine exemplarische Anwendung einzelner V&V-Techniken bestätigt.

Durch die entwickelten Einordnungsmöglichkeiten von V&V-Techniken hinsichtlich ihrer Automatisierbarkeit in Automatisierungsstufen wird der Anwender unterstützt, bei geeigneter Auswahl an Techniken eine qualitativ hochwertige V&V mit vertretbarem Aufwand durchzuführen. Zudem ist die Bewertung von bereits existierenden sowie zukünftig noch zu entwickelnden V&V-Techniken möglich.

Durch die Ableitung von konkreten Automatisierungsstufen für V&V-Techniken unter Berücksichtigung aller verwendeten Inputs kann die Bewertung des Automatisierungspotentials von V&V-Techniken verfeinert werden. Zukünftiges Ziel dieser Forschung ist, einen Überblick über die Automatisierbarkeit etablierter V&V-Techniken zu entwickeln. Durch die Anwendung von V&V-Techniken in unterschiedlichen Anwendungsfällen sollen zudem Informationen gesammelt werden, um eine detailliertere Klassifizierung der Automatisierungsgrade abzuleiten. Dies verfolgt das Ziel, eine bessere Bewertung der Automatisierbarkeit der V&V-Techniken zu ermöglichen. Die Bewertung von V&V-Techniken im Hinblick auf ihre Automatisierbarkeit ist ein erster Schritt in Richtung einer möglichen Automatisierung des gesamten V&V-Prozesses. Ein weiterer geplanter Schritt in dieser Forschung ist die Entwicklung eines Werkzeugs, das die Anwender bei der Auswahl und Implementierung von V&V-Techniken unterstützt. Im Zuge dessen ist zudem eine Metrik zur Bewertung einer erfolgreichen V&V zu entwickeln. Weiter müssen die jeweiligen V&V-Techniken entsprechend ihres Automatisierungspotentials nutzerfreundlich automatisiert bereitgestellt werden.

Literatur

Allen, N.A.; Shaffer, C.A.; Watson, L.T.: Building Modeling Tools that Support Verification, Validation, and Testing for the Domain Expert. In: Kuhl, M.E.; Steiger, N.M.; Armstrong, F.Brad; Joines, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, United States, 4.–7. Dezember 2005, S. 419–426.

- Asfaw, D.L.: Benefits of Automated Testing Over Manual Testing. *International Journal of Innovative Research in Information Security (IJIRIS)* 2 (2015) 1, S. 5–13.
- ASIM: ASIM-Fachtagungen SPL. <https://www.asim-gi.org/fachgruppen/produktion-und-logistik/spl-publikationen>, letzter Zugriff am 25.06.2023.
- Balci, O.: Verification, Validation, and Accreditation. In: Medeiros, D.J.; Watson, E.F.; Carson, J.S.; Manivannan, M.S. (Hrsg.): *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, Washington, D.C., United States, 13.–16. Dezember 1998, S. 41–48.
- Banks, J.: Principles of Simulation. In: Banks, J. (Hrsg.): *Handbook of Simulation*. New York, Chichester, Weinheim: Wiley 1998, S. 3–30.
- Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 2014.
- Bergmann, S.; Strassburger, S.: Challenges for the Automatic Generation of Simulation Models for Production Systems. In *Proceedings of the 2010 Summer Simulation Multiconference*, Ottawa, Canada, 11.–14. Juli 2010, S.545–549.
- Bogon, T.; Timm, I.J.; Jessen, U.; Schmitz, M.; Wenzel, S.; Lattner, A.D.; Paraskevopoulos, D.; Spieckermann, S.: Towards Assisted Input and Output Data Analysis in Manufacturing Simulation: The EDASim Approach. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, Germany, 09.-12. Dezember 2012, S. 1–13.
- Brade, D.: Enhancing Modeling and Simulation Accreditation by Structuring Verification and Validation Results. In: Joines, J.A.; Barton, R.R.; Kang, K.; Fishwick, P.A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Orlando, Florida, United States, 10.–13. Dezember 2000, S. 840–848.
- Chakraborti, T.; Isahagian, V.; Khalaf, R.; Khazaeni, Y.; Muthusamy, V.; Rizk, Y.; Unuvar, M.: From Robotic Process Automation to Intelligent Process Automation. In: Asatiani, A.; García, J.María; Helander, N.; Jiménez-Ramírez, A.; Koschmider, A.; Mendling, J. et al. (Hrsg.): *Business Process Management*. Cham: Springer International Publishing 2020, S. 215–228.
- DIN: DIN IEC 60050-351:2013: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Berlin: Beuth, 2013.
- Endsley, M.R.; Kaber, D.B.: Level of Automation Effects on Performance, Situation Awareness and Workload in a Dynamic Control Task. *Ergonomics* 42 (1999) 3, S. 462–492.
- Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning. In: Stadtler, H.; Kilger, C.; Meyr, H. (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer 2015, S. 71–95.
- Frohm, J.; Lindström, V.; Winroth, M.; Stahre, J.: Levels of Automation in Manufacturing. *International Journal of Ergonomics and Human Factors* 30 (2008) 3, S. 1–28.
- Kleijnen, J.P.: Supply Chain Simulation Tools and Techniques: A Survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling (IJSPM)* (2005), Volume 1 (1–2), S. 82–89.
- Kuhn, A.; Rabe, M.: *Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung*. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.

- Kuhn, A.; Wenzel, S.: Simulation Logistischer Systeme. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 73–94.
- Kumar, P.; Syed, K.: Software Testing – Goals, Principles, and Limitations. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology (IJESAT)* 1 (2011) 1, S. 52–56.
- Langenbach, K.: Untersuchung der Automatisierbarkeit von Verifikations- und Validierungstechniken anhand von Kriterien in der Simulationsdomäne. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Fachgebiet IT in Produktion und Logistik, Masterarbeit, 2023.
- Law, A.M.: *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw Hill Education 2015.
- Peuster, M.; Schneider, S.; Zhao, M.; Xilouris, G.; Trakadas, P.; Vicens, F.; Tavernier, W.; Soenen, T.; Vilalta, R.; Andreou, G.; Kyriazis, D.; Karl, H.: Introducing Automated Verification and Validation for Virtualized Network Functions and Services. *IEEE Communications Magazine* 57 (2019) 5, S. 96–102.
- Rabe, M.; Hellingrath, B.: *Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik: Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen*. Erlangen: SCS European Publishing House 2001.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Roungas, V.; Meijer, S.; Verbraeck, A.: A Framework for Optimizing Simulation Model Validation & Verification. *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 11 (2018) 1–2, S. 137–152.
- Sargent, R.G.: An Introduction to Verification and Validation of Simulation Models. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, Washington, D.C., United States, 8.–11. Dezember 2013*, S. 321–327.
- Sargent, R.G.; Balci, O.: History of Verification and Validation of Simulation Models. In: Chan, W.Kin; D’Ambrogio, A.; Zacharewicz, G.; Mustafee, N.; Wainer, G.; Page, E.H. (Hrsg.): *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference, Las Vegas, Nevada, United States, 3.–6. Dezember 2017*, S. 292–307.
- Sheridan, T.B.: Computer Control and Human Alienation. *Technology Review* 83 (1980), S. 61.
- van der Valk, H.; Winkelmann, S.; Ramge, F.; Hunker, J.; Langenbach, K.; Rabe, M.: Characteristics of Simulation: A Meta-Review of Modern Simulation Applications. In: Feng, B.; Peng, Y.; Pedrielli, G.; Song, E.; Shashaani, S.; Corlu, C.Gunes (Hrsg.): *Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference, Singapore, 11.–14. Dezember 2022*, S. 2558–2569.
- VDI: *VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*. Berlin: Beuth, 2014.
- Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Wishart, J.; Como, S.; Forgione, U.; Weast, J.; Weston, L.; Smart, A.; Nicols, G.; S, R.: Literature Review of Verification and Validation Activities of Automated Driving Systems. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles* 3 (2020) 4, S. 267–323.

Author Index

<i>Aliksieiev, Volodymyr</i>	313
<i>Artiushenko, Viktor</i>	271
<i>Auf der Landwehr, Marvin</i>	1
<i>Barth, Martin</i>	31, 61, 241
<i>Bergmann, Sören</i>	197
<i>Billiet, Harold</i>	207
<i>Bind, Boris</i>	145
<i>Brandl, Holger</i>	443
<i>Brützel, Oliver</i>	11, 71
<i>Brunnenkant, Finn</i>	71
<i>Brützel, Oliver</i>	11
<i>Buchele, Alexander</i>	41
<i>Clausen, Uwe</i>	323
<i>Dettelbacher, Johannes</i>	41
<i>Dilefeld, Maximilian</i>	261
<i>Ehrle, Steven</i>	197
<i>Elbert, Ralf</i>	303
<i>Eley, Michael</i>	251
<i>Emde, Simon</i>	303
<i>Franke, Jörg</i>	31, 61, 241, 433
<i>Galka, Stefan</i>	135, 281
<i>Geoerg, Paul</i>	353
<i>Goppold, Jean-Paul</i>	125
<i>Görtz, Michael Dominik</i>	353
<i>Grafelmann, Michaela</i>	313
<i>Granig, Alexander</i>	423
<i>Grasser, Dominik</i>	281
<i>Grzona, Pierre</i>	187
<i>Guhr, Oliver</i>	167
<i>Gutwald, Benjamin</i>	31
<i>Handrich, Konrad</i>	403
<i>Hochhaus, Markus</i>	145
<i>Hohm, Jonathan</i>	281
<i>Huster, Sandra</i>	81
<i>Ihlenfeldt, Steffen</i>	51
<i>Jahn, Carlos</i>	313
<i>Jelibaghu, Mustafa</i>	251
<i>Jurgeleit, Lasse</i>	323
<i>Kexel, Marec</i>	333
<i>Kiefer, Maximilian</i>	293, 323
<i>Kippenberger, Johanna Kim</i>	353
<i>Klima, Tobias</i>	293
<i>Knapp, Marc</i>	91
<i>Knothe, Thomas</i>	125
<i>Kogler, Christoph</i>	21

<i>Krockert, Martin</i>	167, 453
<i>Kühn, Mathias</i>	403
<i>Kunz, David</i>	241
<i>Lahooti, Pooria</i>	433
<i>Lang, Sebastian</i>	271
<i>Lange, Annika</i>	125
<i>Langenbach, Katharina</i>	473
<i>Lanza, Gisela</i>	11, 71
<i>Laroque, Christoph</i>	177
<i>Lavery, Melanie</i>	31
<i>Leißau, Madlene</i>	177
<i>Leopold, Nadiia</i>	343
<i>Lödding, Hermann</i>	313
<i>Maaßen, Jonas</i>	293
<i>Mai Thi, Yen</i>	187
<i>Maleki, John Christopher</i>	353
<i>Marinković, Minja</i>	135
<i>März, Lothar</i>	229
<i>März, Martin</i>	31
<i>Matthes, Marvin</i>	167, 453
<i>Matysczok, Carsten</i>	113
<i>May, Marvin Carl</i>	11
<i>Mayer, Gottfried</i>	155
<i>Mayer, Thomas</i>	343
<i>Meisner, Kai</i>	343
<i>Meißner, Sebastian</i>	135, 281
<i>Meseth, Nicolas</i>	373
<i>Miltenberger, Robert</i>	145
<i>Molzberger, Mike</i>	413
<i>Mowe, Maximilian</i>	323
<i>Müller, Marcel</i>	271
<i>Munkelt, Torsten</i>	167, 453
<i>Münnich, Marc</i>	51, 187
<i>Oetjegerdes, Patrick</i>	413
<i>Overbeck, Leonard</i>	11, 71
<i>Özkul, Felix</i>	155, 463
<i>Palatnik, Alexander</i>	251
<i>Pappert, Falk Stefan</i>	393
<i>Rabe, Markus</i>	293, 473
<i>Rauch, Peter</i>	21
<i>Reggelin, Tobias</i>	271
<i>Riester, Martin</i>	423
<i>Rose, Oliver</i>	343, 363, 383, 393
<i>Rosenberg, Sonja</i>	81
<i>Roßbach, Philipp</i>	443
<i>Rudi, Andreas</i>	81
<i>Russwurm, Eva</i>	31
<i>Scheer, Richard</i>	91
<i>Scheidler, Anne Antonia</i>	473

<i>Schlüter, Wolfgang</i>	41
<i>Schmid, Alexander</i>	423
<i>Schmid, Florian</i>	135, 281
<i>Schmidt, Thorsten</i>	403
<i>Schmidtpott, Jürgen</i>	145
<i>Schmitz, Lea</i>	217
<i>Schobert, Marvin</i>	433
<i>Schrage, Tobias</i>	61
<i>Schuderer, Peter</i>	61
<i>Schultmann, Frank</i>	81
<i>Schumacher, Christin</i>	323
<i>Schwanninger, Raffael</i>	31
<i>Seuffterth, Daniel</i>	363, 393
<i>Sihn, Wilfried</i>	423
<i>Sobotka, Thomas</i>	423
<i>Spengler, Thomas Stefan</i>	413
<i>Spieckermann, Sven</i>	155, 463
<i>Spoor, Jan Michael</i>	103
<i>Staritz, Johannes</i>	1
<i>Stark, Rainer</i>	207
<i>Stauber, Stephan</i>	281
<i>Stein, Heiderose</i>	343, 363, 393
<i>Stenzel, Jonas</i>	217
<i>Stöhr, Niklas</i>	155
<i>Straßburger, Steffen</i>	91
<i>Sutherland, Robin</i>	463
<i>Tadumadze, Giorgi</i>	303
<i>Terbrack, Hajo</i>	443
<i>Thiede, Sebastian</i>	51
<i>Torka, Jan</i>	125
<i>Uhlig, Tobias</i>	343, 363
<i>Unterladstätter, Thomas</i>	81
<i>Vogeler, Udo</i>	413
<i>Völker, Sven</i>	167
<i>von Viebahn, Christoph</i>	1
<i>Wartenberg, Maylin</i>	1
<i>Weber, Jacob</i>	241
<i>Weber, Jens</i>	103
<i>Weckenborg, Christian</i>	413
<i>Weidinger, Felix</i>	303
<i>Wenzel, Julia</i>	303
<i>Wenzel, Sigrid</i>	155, 463
<i>Werz, Pascal</i>	11
<i>Wincheringer, Walter</i>	333
<i>Zhou, Zhugen</i>	383
<i>Zisgen, Horst</i>	145
<i>Zmijewski, Philipp</i>	373
<i>Zöllner, Rico</i>	403
<i>Zumpe, Florian</i>	187



ISBN 978-3-86360-276-5



9 783863 602765



20. ASIM Fachtagung
ASIM-Mitteilung Nr. 187

tu
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

universitätsverlag *ilmenu*
