

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)

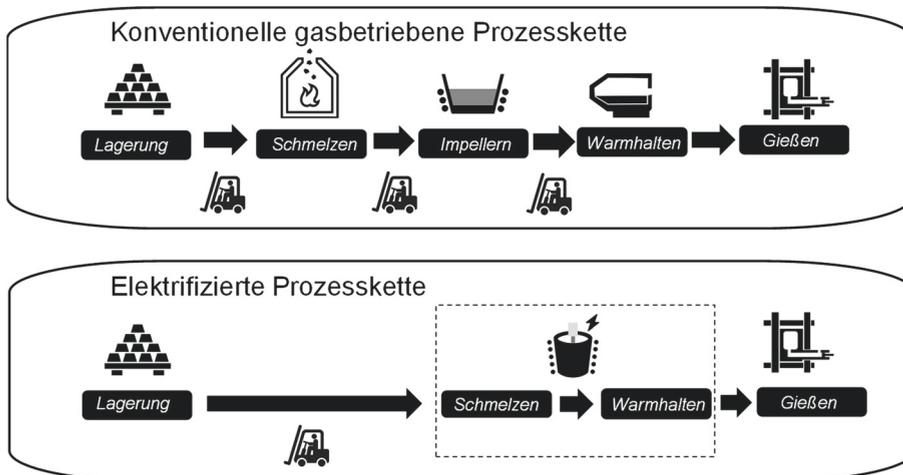


Abbildung 1: Vergleich der konventionellen und transformierten Prozesskette

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.

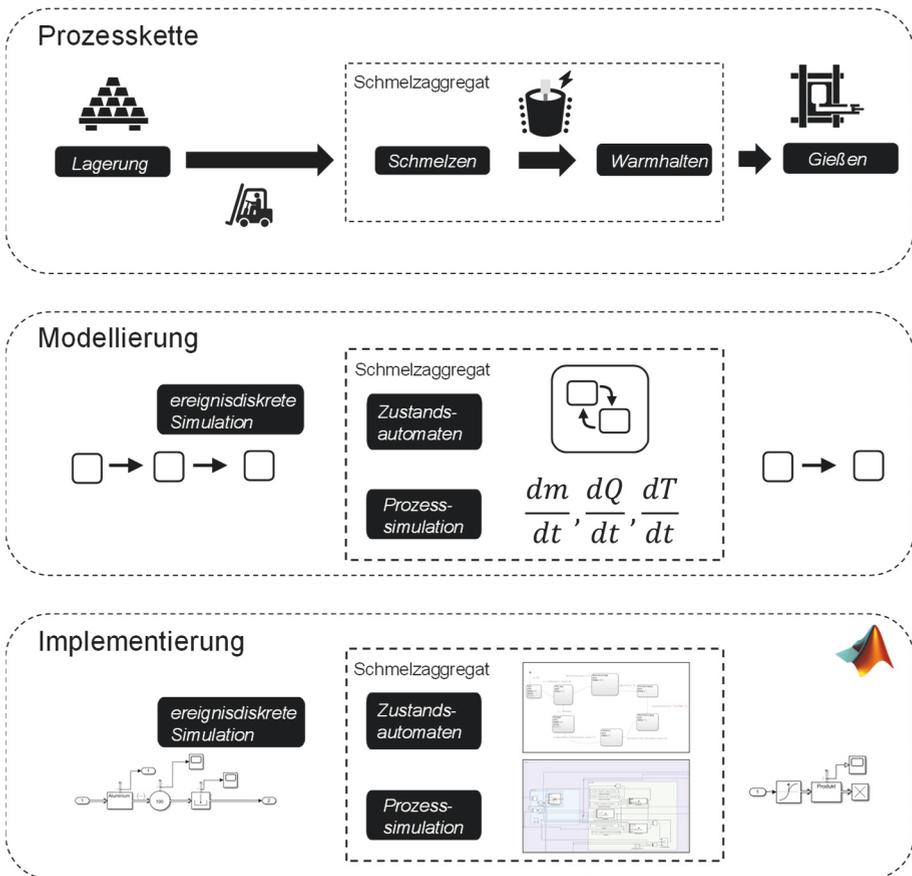


Abbildung 2: Schritte zur Implementierung des Simulationsmodells

Das Schmelzaggregatmodell dient als Submodell für eine Gießereinheit, die eine Gussmaschine mit zwei Schmelzaggregaten in Tandemanordnung zusammenfasst. Die Gießereinheit 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.

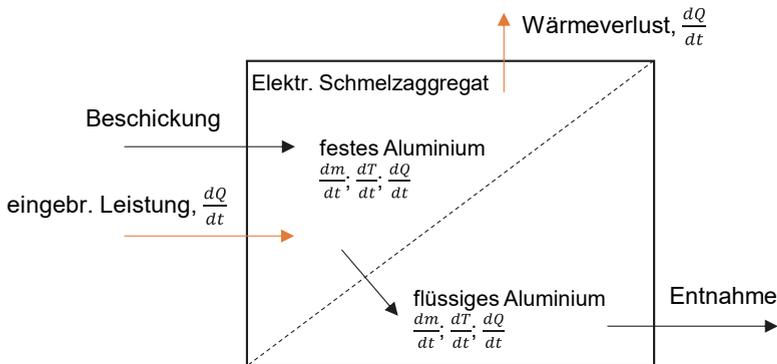


Abbildung 3: Modellierung des elektrischen Schmelzaggregates

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 Konfigurationen 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.

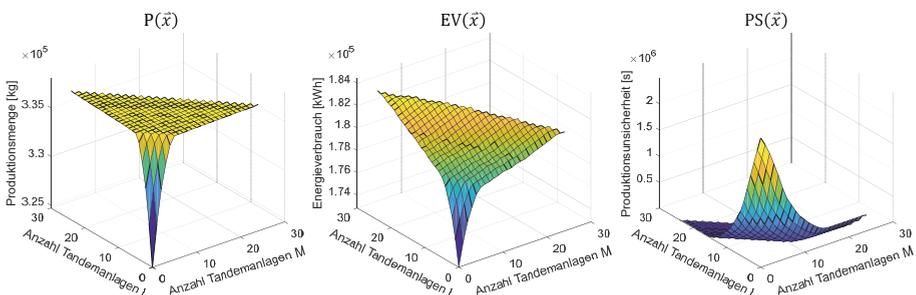


Abbildung 4: Konfigurationsabhängigkeit der Bewertungskriterien

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.

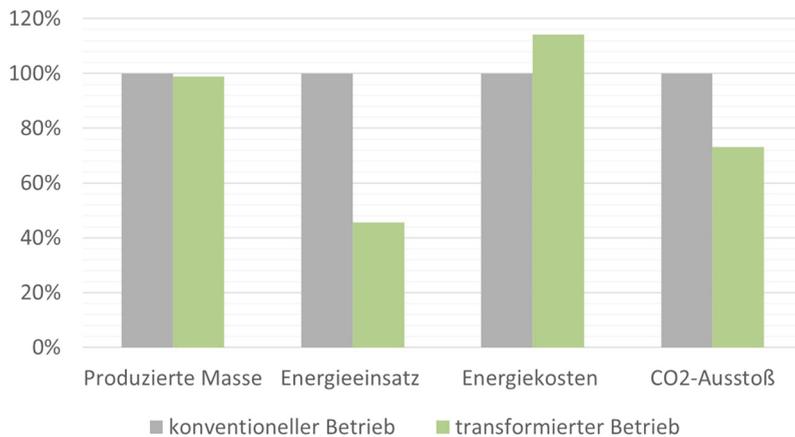


Abbildung 5: Vergleich des konventionellen mit dem transformierten Betrieb

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.