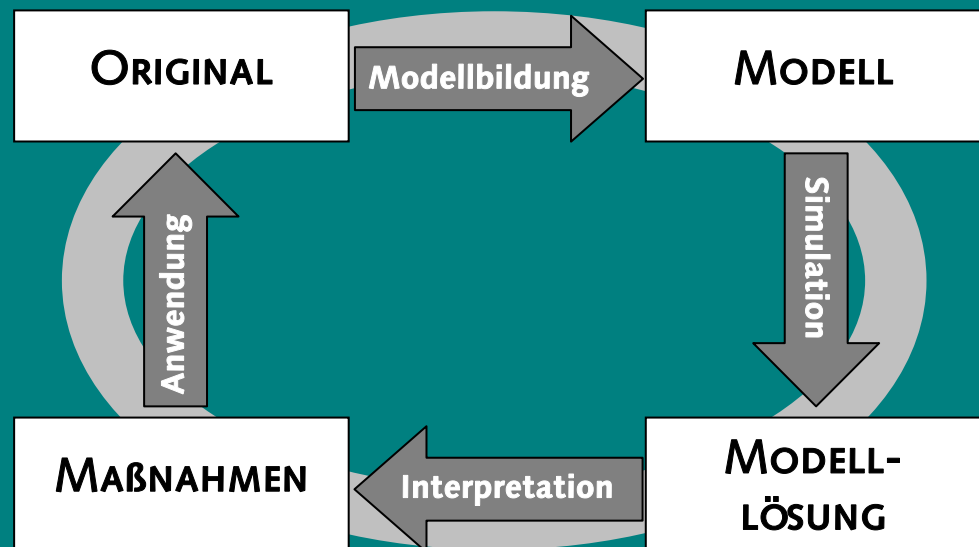


# TAG DES BAUBETRIEBS 2008 TAGUNGSBEITRÄGE

AUF DEM WEG ZUM  
DIGITALEN (BAU-)HAUS-BAU

FORSCHUNGSWORKSHOP  
ZUR SIMULATION  
VON BAUPROZESSEN



Beiträge

vom Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen  
am 31. März 2008 in Weimar

---

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M. Sc.

Professur Baubetrieb und Bauverfahren  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Bauhaus-Universität Weimar

Marienstraße 7, 99423 Weimar  
Postanschrift: 99421 Weimar

Tel.: (03643) 58 4563

Fax.: (03643) 58 4565

<http://www.uni-weimar.de/Bauing/baubet/>

Redaktionelle Bearbeitung und Gestaltung: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Steinmetzger

Druck: Blueprint kopie\_druck\_medien gmbh weimar

**SCHRIFTEN DER PROFESSUR BAUBETRIEB UND BAUVERFAHREN  
NR. 17 (2008)**

**Auf dem Weg  
zum digitalen (Bau-)haus-Bau**

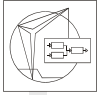
**Forschungsworkshop  
zur  
Simulation von Bauprozessen**

**am 31. März 2008 in Weimar**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.

2008

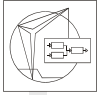
Bauhaus-Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Professur Baubetrieb und Bauverfahren



# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, Dipl.-Ing. Ralf Kraul</i>	
<b>Ablaufsimulation zur Planung von Bauprojekten am Beispiel eines U-Bahnhofs</b>	<b>5</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, Dipl.-Ing. Cornelia Klaubert, Dipl.-Ing. Markus Schorr</i>	
<b>Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“ (ForBAU) digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung</b>	<b>11</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Markus König, Dipl.-Ing. Ulrike Beißert</i>	
<b>Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen</b>	<b>17</b>
<i>Dipl.-Ing. Oliver Weber, Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus</i>	
<b>Erfassung von Bauprozessdaten zur zeitnahen Steuerung von Bauproduktionsprozessen mit RFID</b>	<b>37</b>
<i>Dipl.-Ing. Harald Vennegeerts</i>	
<b>Bauwerksscans in Echtzeit</b>	<b>43</b>
<i>Dr.-Ing. Jörg Weber</i>	
<b>Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3-D CAD Daten</b>	<b>59</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.</i>	
<b>Montagestrategien und die Logik der Bauprozesse</b>	<b>81</b>





## Vorwort

Sehr geehrte Leser,

am 31. März 2008 veranstalteten die Professur Baubetrieb und Bauverfahren und die Juniorprofessur Theoretische Methoden des Projektmanagements der Bauhaus-Universität Weimar einen ganztägigen Workshop mit dem Titel: „Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau“.

Damit sollte die im Herbst 2007 an der Universität Kassel unter dem Titel „Simulation in der Bauwirtschaft“ begonnene Reihe von Workshops eine Fortsetzung finden. Der Schwerpunkt wurde dieses Mal auf die Simulation von Bauprozessen gesetzt – Simulation mit dem Ziel, Arbeitsvorbereitung, Bauausführung und Baustellencontrolling digital zu unterstützen.

In diesem Workshop erhielten die Referenten Gelegenheit, von ihren aktuellen Forschungsarbeiten zu berichten und mit den Teilnehmern über ihre Forschungsansätze, weitere Entwicklungen und mögliche Synergien zu diskutieren.

Seit dem Kasseler Workshop vom 13. August 2007 sind wiederum einige sichtbare Fortschritte zu vermelden.

In zwei DFG-Rundgesprächen am 21./22. September 2007 in Berlin und am 21./22. Januar 2008 in Darmstadt haben Baubetriebler, Bauinformatiker und Geodäten ihre Visionen zur Simulation von Bauprozessen diskutiert und weiter entwickelt. An der TU München wurde das Forschungsvorhaben „FORBAU, Virtuelle Baustelle – digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung“ gestartet.

An der Bauhaus-Universität Weimar haben wir unsere Zusammenarbeit bezüglich der Simulation des Ausbaus mit der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft intensiviert. In Dresden hat das Projekt „Ausbau des neutralen Artikelkatalogs und Transfermaßnahmen“ Fahrt aufgenommen. In Wuppertal laufen erste Feldversuche mit RFID-Technik zum Monitoring von Liefervorgängen auf Baustellen. Die genannten und noch weitere Projekte sind also auf gutem Weg.

Allen Referenten danken wir herzlich für ihren Beitrag zum Gelingen der Veranstaltung und dieser Broschüre.

Weimar, im Juli 2008

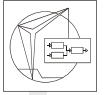
Prof. Dr. Hans-Joachim Bargstädt M. Sc  
Professur Baubetrieb und Bauverfahren

und

Prof. Dr.-Ing. Markus König  
Junior-Professur Theoretische  
Methoden des Projektmanagements







## **Ablaufsimulation zur Planung von Bauprojekten am Beispiel eines U-Bahnhofs**

---

### **Einleitung**

Die Versorgung der Baustelle mit den benötigten Materialien, Maschinen und Betriebsmitteln sowie die Entsorgung von Abraum sind Schlüsselprozesse für den Baufortschritt und stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar. Die Planung der dazu benötigten Transporte wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst und stellt dadurch einen komplexen Prozess dar. Dennoch steht meist keine objektive Entscheidungshilfe für eine effiziente Einsatzplanung zur Verfügung und die Transporte werden daher nicht detailliert und aktiv im Voraus geplant, sondern von den verantwortlichen Bauleitern auf Basis von Erfahrungswerten veranlasst. Im Bereich der Baulogistik, die für das Bauwerk keine wertschöpfende Tätigkeit im eigentlichen Sinne darstellt, könnte eine Entscheidungshilfe für die Planung der Transportlogistik jedoch zur Hebung deutlicher Einsparpotenziale führen.

In der Konstruktion zeigt sich ein allmählicher Übergang von der Nutzung rein zweidimensional arbeitender Konstruktionswerkzeuge hin zu einer verstärkten Nutzung von dreidimensionalen Konstruktions- und Planungswerkzeugen. Neben den drei räumlichen Dimensionen spielt im Bereich der Bauablaufplanung zusätzlich auch der zeitliche Ablauf eine wichtige Rolle, schließlich kann das Dach eines Hauses zwar vor dem Fundament konstruiert, aber nicht gebaut werden. Ziel der Forschung ist es daher, eine neue Methode der Bauablauf- und Transportplanung zu entwickeln, die es ermöglicht, sowohl die zeitliche Komponente des Baufortschritts als auch die geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen, und damit quasi vierdimensional arbeitet.

### **Allgemeines zur Ablaufsimulation**

Rechnergestützte Methoden zur Prozess und Ablaufplanung haben sich im Bereich der Fabrik- und Logistikplanung bereits seit einiger Zeit etabliert. Zum Einsatz kommt bei der Planung der anfallenden Materialflüsse vor allem die Ablaufsimulation, die eine Abbildung der Prozesse und Materialströme im Rechner ermöglicht und so bereits in frühen Phasen des Planungsprojekts detaillierte und realistische Aussagen über die Funktionsweise der geplanten Anlagen und Materialströme erlaubt. So können früh Aussagen über das Verhalten komplexer Produktionssysteme oder die Auswirkung von Störungen auf diese Systeme getroffen werden und Kenntnis über Leistungen, mögliche Engstellen und optimale Betriebsparameter erlangt werden.

Forschungsansatz des Lehrstuhl fml ist es, durch die Übertragung von Methoden, die sich bei der Fabrikplanung bewährt haben, die Grundlage für eine neue Art der Ablaufplanung im Bauwesen zu bilden. Vor allem in der Transportplanung bietet die Simulation der Abläufe ein großes Potential zur Produktivitätssteigerung.

Die Simulation ermöglicht im Gegensatz zu einer statischen Berechnung, auch die Wechselwirkungen der Transporte und der Einzelprozesse untereinander zu berücksichtigen. Durch die im Modell hinterlegte Logik wirken sich Verzögerungen in einzelnen Prozessen direkt auf die betroffenen weiteren Prozesse aus und werden so in der Planung realistisch berücksichtigt. Zudem können auch stochastische Einflüsse, wie zum Beispiel längere Fahrzeiten zu gewissen Tageszeiten, bei der Planung berücksichtigt werden.

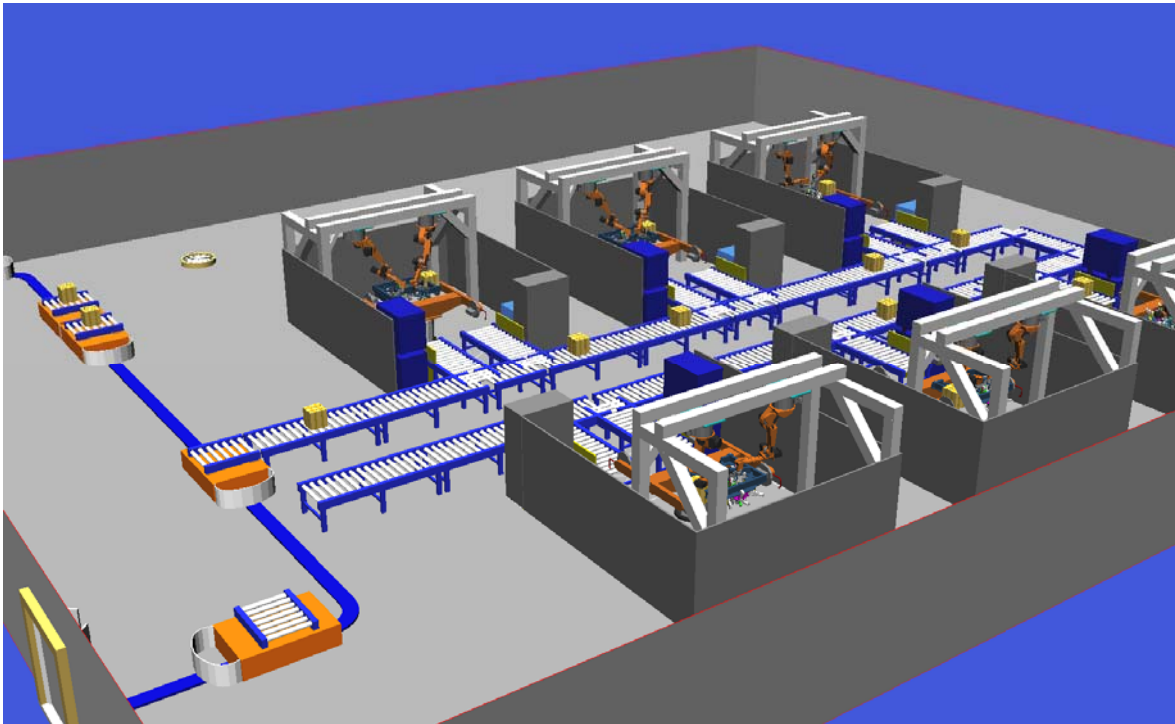


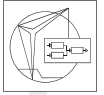
Bild 1 Ablaufsimulation in der Fabrikplanung

## Voraussetzungen für den Einsatz der Ablaufsimulation bei der Planung von Bauprojekten

Im Gegensatz zur Fabrikplanung stellt eine Baustelle mit ihren oft auch räumlich weit verteilten Einzelprozessen einen deutlich schwieriger abzugrenzenden Untersuchungsgegenstand für die Simulation dar. Wichtig ist daher, vor einer Simulation eine klare Abgrenzung der zu simulierenden Teilprozesse vorzunehmen und die Ziele der Simulation klar zu definieren. Da es als unmöglich erscheint, die auf einer Baustelle anfallende große Zahl manueller Tätigkeiten detailliert und vor allem auch realistisch abzubilden, empfiehlt es sich, den Abstraktionsgrad der Modellierung möglichst hoch anzusetzen. Wichtig ist es hierbei, die Balance zwischen einer pseudogenauen Abbildung, die hohen Aufwand bei der Modellbildung, aber keinen Mehrwert für das Ergebnis bringt, und einer zu groben Abbildung, die nicht mehr mit der Realität übereinstimmt, zu halten.

Der größte Unterschied zwischen Fabrik- und Bauablaufsimulation besteht in der Art des „Werkstücks“: In der Materialflussplanung handelt es sich meist um stationäre Anlagen, in denen die beweglichen Werkstücke bearbeitet werden. Im Gegensatz dazu kann auf der Baustelle das Bauwerk selber als „Werkstück“ angesehen werden, das von mobilen Geräten bearbeitet wird. Wichtiger und in der Simulation am schwierigsten abzubilden ist jedoch die Tatsache, dass das Werkstück Baustelle gleichzeitig auch den Arbeitsraum darstellt, der sich im Verlauf des Bauprozesses auch ständig verändert. Im Gegensatz zur Simulation einer Fabrik, bei der die einmal definierten Fahrwege und Positionen der Maschinen im Normalfall nicht verändert werden, muss bei der simulativen Abbildung einer Baustelle dieser Tatsache Rechnung getragen werden.

## Beispiel U-Bahn Amsterdam



Getestet wurde der Einsatz der Ablaufsimulation im Bereich der Bauablaufplanung in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen der MAX BÖGL Bauunternehmung GmbH, Sengenthal, und dem Lehrstuhl fm der TU München. Projektgegenstand war der U-Bahnhof Rokin, der Teil der im Bau befindlichen „Noord-Zuidlijn“ (Nord-Süd-Linie) ist. Der Bahnhof muss in sehr beengter Innenstadtlage gebaut werden (siehe Bild 2) und die belebte Einkaufsstraße Rokin muss während der gesamten Bauzeit sowohl für Fußgänger, als auch für den Auto- und Straßenbahnverkehr geöffnet bleiben. Um das zu gewährleisten, wird der Bau des Bahnhofs in Deckelbauweise abgewickelt, wobei der Abtransport des Aushubs sowie das Einbringen des Baumaterials und der zur Abstützung der Seitenwände des Bahnhofs während der Aushubphase notwendigen Aussteifungen über im Deckel befindliche Öffnungen erfolgt. Die Ver- und Entsorgung der Baustelle stellt also einen besonders wichtigen Punkt in der Planung dar. Um die Frage nach der Anzahl und zeitlichen Verteilung der dazu notwendigen Transporte zu klären, wurde entschieden, diese Baustelle exemplarisch mit Hilfe der Ablaufsimulation abzubilden.



Bild 2 Baustellenbild Amsterdam (Quelle: Max Bögl Bauunternehmung GmbH)

Das Simulationsmodell der Baustelle wurde im Simulationssystem eM-Plant (jetzt Plant Simulation) von SIEMENS Produkt Lifecycle Management Software (DE) GmbH erstellt. Dieses Werkzeug ist im Bereich der Fabrik- und Materialflussplanung weit verbreitet und wird, zum Beispiel, bei fast allen deutschen Automobilherstellern als Standardwerkzeug für die Absicherung von geplanten Produktionssystemen eingesetzt. Es bietet die Möglichkeit einer graphischen, bausteinorientierten Modellerstellung, kann jedoch durch eine eigene sehr mächtige Programmiersprache sehr weitgehend an die Erfordernisse der speziellen Aufgabe angepasst werden.

### Aufbau des Modells

Wie in Bild 3 ersichtlich, besteht die Ansicht des Simulationsmodells aus der Draufsicht der Baustelle und einem Querschnitt. So wird es möglich, einerseits den LKW-Verkehr auf dem Baufeld, andererseits aber auch den Baufortschritt unter Tage zu verfolgen. Zur Abbildung der beim Bau des U-Bahnhofs anfallenden Prozesse wurde eine Vielzahl von modularen und wiederverwendbaren Simulationsbausteinen implementiert. Wichtige Elemente hierbei sind zwei Portalkrane und ein Seilbagger sowie eine anpassbare LKW-Fahrstrecke, durch die die Wegstrecken auf dem Baufeld, aber auch die Fahrzeit der LKW zum Abtransport des Abraums abgebildet werden. Da der Bau des Bahnhofs in Ebenen organisiert ist, kommt der Steuerung des Zeitpunkts des Ebenenwechsels besondere Bedeutung zu. Hier muss eine übergeordnete Steuerungsebene die Fertigmeldungen der Teilprozesse (z. B. der Portalkrane und des Seilbaggers) registrieren und den Ebenenwechsel erst dann starten, wenn alle Prozesse beendet sind.

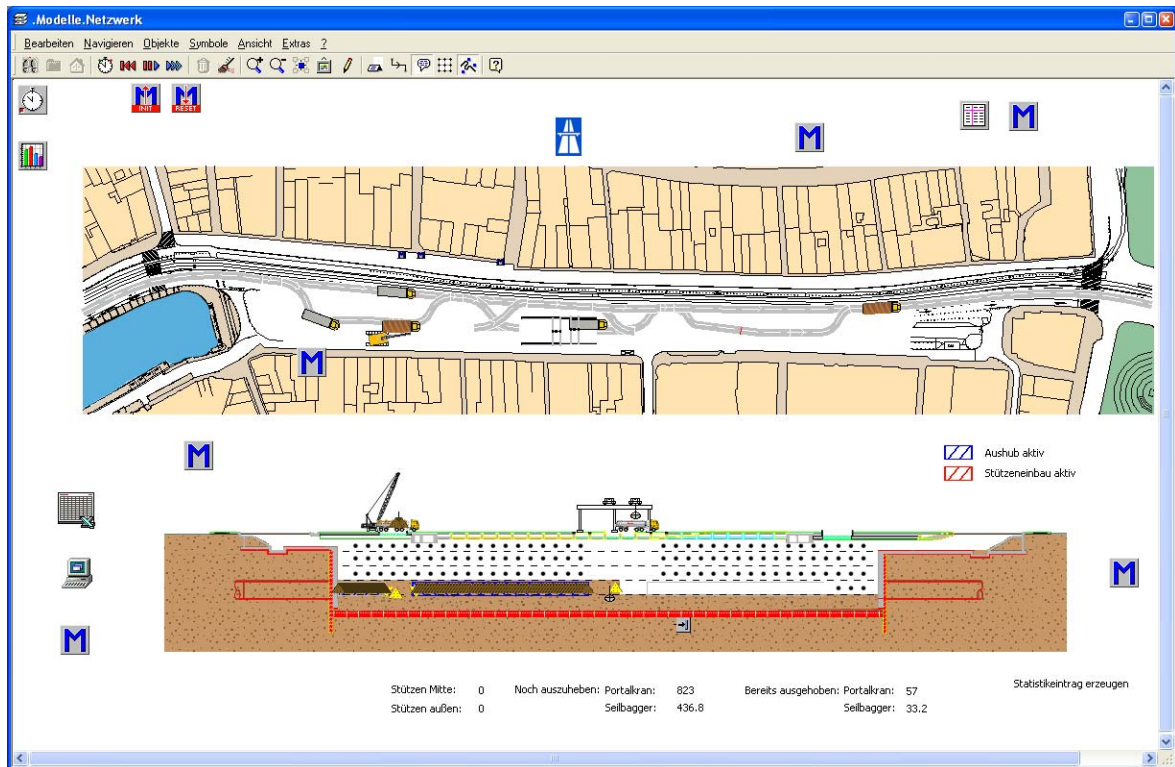


Bild 3 Screenshot des Simulationsmodells des U-Bahnhofs Rokin

Um die praktische Einsatzfähigkeit des Modells zu gewährleisten, war es notwendig, eine einfache Möglichkeit sowohl zur Konfiguration des Modells, als auch zur Auswertung der vom Modell generierten Daten zu schaffen. Für beide Anforderungen wurde auf Microsoft Excel zurückgegriffen, um die Parametrierung und Auswertung der Simulationsexperimente möglichst unabhängig vom Simulationssystem eM-Plant durchführen zu können.

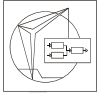
## Ergebnisse

Im Pilotprojekt „U-Bahnhof Rokin“ wurden die Potenziale, die in der Bauablaufsimation liegen, deutlich. Hauptsächlich wurden mit dem Simulationsmodell Fragestellungen untersucht, die mit den zum Abtransport des Abraums benötigten LKW zusammenhingen. Neben der Anzahl der LKW, die in den einzelnen Bauphasen benötigt werden, konnte auch die zeitliche Verteilung der Transporte ermittelt werden. Auch die Abstimmung der beiden Kernprozesse Aushub und Einbau von Aussteifungen in die Baugrube konnte untersucht werden.

Die Simulation bietet über die durch die Simulationsläufe ermittelten Daten hinaus einen weiteren, jedoch schwer quantifizierbaren Nutzen: Die für die Modellbildung unabdingbare Systematisierung des Bauablaufs erzwingt eine frühe, sehr eingehende Beschäftigung mit dem Bauprozess. So werden bereits wesentlich früher als im normalen Planungsablauf Schwachstellen erkannt und können im Voraus vermieden werden. Zudem steigt die Systemkenntnis bei allen Beteiligten.

## Kopplung von Simulation und Bauzeitenplan

Einen Ansatz, die Simulation durchgängig in die Bauablaufplanung zu integrieren, stellt die Kopplung der Simulation mit einem Projektplanungswerkzeug dar. Die Vision hierbei ist, die Simulation zu nutzen, um Hilfestellung sowohl bei der Erstellung des Projektplans als auch bei seiner Überprüfung und eventuellen Änderungen zu bieten. So könnten Verzögerungen im Bauablauf in die Simulation



eingepflegt werden, und Experimente mit den neuen Ausgangsdaten könnten Aufschluss über die zu erwartenden neuen Prozessdauern geben. Da die gegenseitigen Abhängigkeiten der Einzelprozesse ja bereits bei der Implementierung des Simulationsmodells in seine innere Logik integriert wurden, werden kritische Prozesse schnell sichtbar. Der Bauzeitenplan wird so von einem statischen Element zu einem lebendigen Werkzeug.

In einem ersten Schritt in diese Richtung wurde am Lehrstuhl fml die Kopplung des in eM-Plant implementierten Simulationsmodells an einen MS Project-Zeitplan durchgeführt.

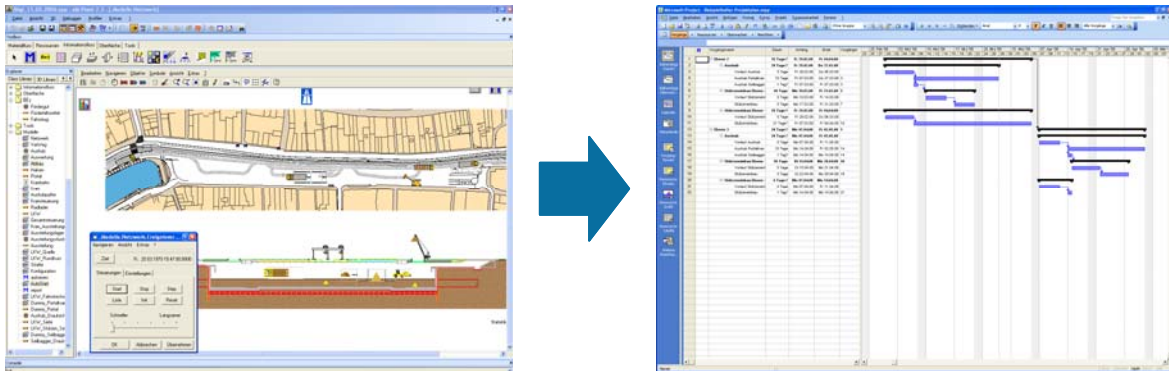


Bild 4 Kopplung des Simulationsmodells an MS Project

Dazu protokolliert die Software des Simulationsmodells die Start- und Endzeiten ausgewählter Prozessschritte und sammelt sie in einer Tabelle. Nach Abschluss der Simulation können die ermittelten Daten über einen ActiveX-Baustein direkt an MS Project übermittelt werden und liegen dann dort als vollständiger Prozessplan vor. Neben der Neuerstellung des Plans ist auch die Aktualisierung eines bestehenden Projektplans mit von der Simulation neu ermittelten Prozesszeiten möglich. In einer beispielhaften Anwendung könnte so eine Verzögerung auf der realen Baustelle, z. B. durch den Ausfall des Seilbaggers, in die Simulation eingegeben werden und der Bauablaufplan könnte kurze Zeit später in aktualisierter Form vorliegen. Durch die integrierte Logik des Simulationsmodells berücksichtigt der aktualisierte Plan auch alle Abhängigkeiten der Einzelprozesse.

## Ausblick

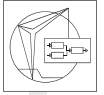
Ziel der Forschung am Lehrstuhl fml ist es, analog zur Digitalen Fabrik die Vision einer virtuellen Baustelle zu verwirklichen. Dabei wirkt die Bauablaufsimulation gekoppelt mit ihren Vorgänger- und Nachfolgerwerkzeugen (z. B. MS Project und Revit) als Teil einer durchgängigen digitalen Planungsprozesskette. Dieses Ziel wird auch im neuen Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“ – ForBAU verfolgt, der sich mit digitalen Methoden und Werkzeugen für die Baubranche beschäftigt.

Nähere Informationen zu den Forschungstätigkeiten des Lehrstuhls im Bereich der Simulation von bauleistungsprozessen erhalten Sie bei:

Dipl.-Ing. Ralf Kraul  
kraul@fml.mw.tum.de  
089/289-15957

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik – fml  
TU München  
Boltzmannstraße 15  
85748 Garching





## **Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“ (ForBAU) digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung**

---

### **Abstract**

Im Januar 2008 startete der Bayerische Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“ – ForBAU. Der Kerngedanke des Forschungsprojektes besteht in der ganzheitlichen Abbildung eines komplexen Bauvorhabens in einem digitalen Baustellenmodell, das in allen Projektphasen als zentrales Planungsinstrument verwendet wird. Dazu ist eine Integration der Daten aus den verschiedenen Bereichen, wie der Planung, Vermessung, Arbeitsvorbereitung, Buchhaltung und der Baustelle selbst, durch eine zentrale Datenplattform mit standardisierten Schnittstellen zu der bestehenden, meist sehr heterogenen EDV-Systemlandschaft notwendig. Durch eine Kopplung zwischen Baugrund-, Baugruben-, Baustelleneinrichtungs-, Bauwerks- und Simulationsmodell in einem Baustelleninformationsmodell können weitreichende Optimierungspotenziale im gesamten Ablauf nutzbar gemacht werden. Das Modell wird über das Bauvorhaben hinweg dynamisch aktualisiert und liefert den verschiedenen Nutzern durch gezielte Abfragen zu jeder Projektphase die relevanten technischen und wirtschaftlichen Informationen.

Kritische Prozesse oder Abläufe sollen vorab im virtuellen Modell des Bauvorhabens getestet werden, um später auf der realen Baustelle ohne Verzögerungen und unnötige Stillstandszeiten durchgeführt werden zu können. Auch der wirtschaftliche Erfolg eines Bauvorhabens kann über die virtuellen Modelle bereits in frühen Projektphasen abgeschätzt werden. Während der gesamten Bauzeit soll die tatsächlich erbrachte Leistung auf der Baustelle durch mobile EDV-Systeme online dokumentiert und in das Baustelleninformationsmodell eingepflegt werden, um auch dort den Baufortschritt zu protokollieren und im Bedarfsfall die Planungen anpassen zu können. Somit entstehen dynamische 4D-Modelle der Baustelle, die neben der Geometrie und dem zeitlichen Verlauf auch Aspekte, wie z. B. qualitätsrelevante Daten oder Kostenkennzahlen, beinhalten.

Um den Praxisbezug der erarbeiteten Resultate sicherzustellen, werden die Forschungsergebnisse parallel auf zwei Demonstrationsbaustellen validiert.

### **Ausgangssituation**

Die deutsche Bauwirtschaft steht gegenwärtig vor der Aufgabe, ihre Kostennachteile gegenüber EU-Konkurrenten mit deutlich niedrigerem Lohnniveau wettzumachen. Da die Unternehmen jedoch nur bedingt Einfluss auf die Personalkosten nehmen können, muss der Weg zum wirtschaftlichen Bauen über effiziente Prozessstrukturen und technisch-organisatorische Innovationen sowohl in den Bauprozessen als auch in der gesamten Bauabwicklung führen.

Besonders im Wettbewerb um die Ausführung komplexer Bauvorhaben, wie beispielsweise der neuen BMW-Welt oder dem geplanten Umbau des Münchner Hauptbahnhofes, liegen die Chancen der deutschen Bauunternehmen in der Besetzung einer technologischen Führungsposition. Die Herausforderungen bei derartigen Projekten liegen nicht nur in der Komplexität des Bauens selbst begründet, sondern auch in den speziellen Anforderungen an die Bauabwicklung durch die Randbedingungen des Bauens im Bestand einer Großstadt.



Für die Bauwirtschaft wurden bisher jedoch kaum ganzheitliche Optimierungsansätze, die in anderen Industriezweigen mittlerweile weit verbreitet sind, wie beispielsweise Supply Chain Management (SCM), mit wissenschaftlichen Methoden erarbeitet. Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Bauwirtschaft mit ihren „handwerklich“ geprägten Strukturen wird die Adaption von Konzepten und Praktiken moderner Industrieorganisation, Produktionstechnologien sowie deren Logistiksystemen und -strategien sein.

Ein wesentlicher Unterschied der Baubranche zur „klassischen“ Industrie besteht darin, dass die Strukturen auf der Baustelle stets temporär sind und jedes Bauvorhaben ein Unikat darstellt. Eine Ablauf- und Prozessplanung kann daher nicht mit demselben Detaillierungsgrad und mit dem gleichen Aufwand betrieben werden wie beispielsweise in der Automobilindustrie, da die Randbedingungen nicht starr und die Prozesse nicht derart strikt strukturiert sind. Dennoch sind standardisierte Vorgehensweisen und EDV-Hilfsmittel erforderlich, um ein Bauvorhaben hinsichtlich Terminen, Kosten und Qualität optimal abwickeln zu können.

Ein weiteres Defizit ist die unzureichende Einbindung der CAD-Modelle in den Baufortschritt und den gesamten Lebenszyklus eines Bauvorhabens. 2D-CAD-Pläne zählen in der Bauindustrie bereits seit langem zum Stand der Technik, die Möglichkeiten und Potenziale einer ganzheitlichen 3D-Modellbasierten Planung mit zahlreichen Zusatzinformationen im Modell werden zurzeit jedoch nur vereinzelt genutzt. So erfolgt die Modellbildung auf Basis dreidimensionaler Vermessungsdaten bisher mit sehr geringer Automation, obwohl die direkte Ableitung von 3D-Körpern aus Punktwolken schon heute möglich wäre. Während in anderen Branchen bereits seit einigen Jahren integrierte Produktmodelle für Design, Konstruktion, Fertigung und Qualitätsmanagement über PDM<sup>1</sup>-Systeme organisiert und verwaltet werden, sind CAD-Systeme in der Baubranche oftmals nur als digitale Zeichenbretter im Einsatz.

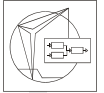


Bild 1 Neue Technologiefelder für die virtuelle Bauabwicklung

<sup>1</sup> PDM – Produktdatenmanagement



## Projektstruktur und Zielsetzungen



Der Forschungsverbund setzt sich aus vier Teilprojekten (TP) und drei Arbeitskreisen (AK) zusammen.

Die zentrale Idee des Forschungsverbundes ist die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie. Sowohl wissenschaftliche Mitarbeiter als auch Vertreter der Industrie arbeiten gemeinsam an den einzelnen Teilprojekten. Neben den vier Teilprojekten arbeiten sowohl die beteiligten Institute als auch die Industriepartner in drei fortlaufenden Arbeitskreisen themenübergreifend zusammen, um die Vernetzung innerhalb des Verbundes noch weiter zu intensivieren. Eine scharfe Trennung der vier Teilprojekte ist auf Grund der komplexen Abhängigkeiten schwer möglich.

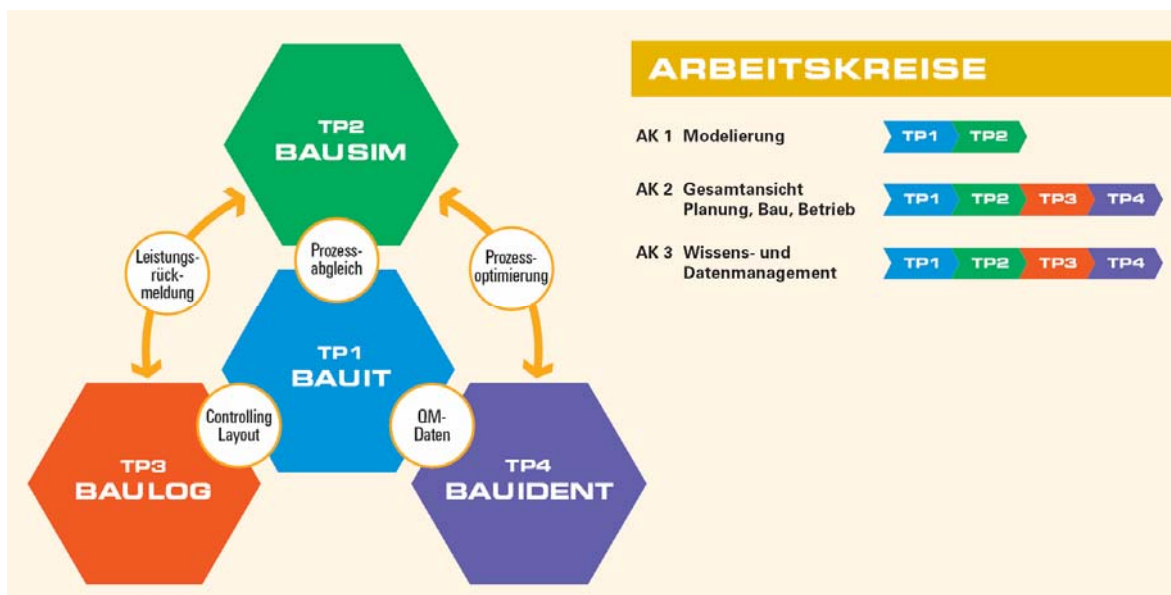


Bild 2 Struktur des Verbundes

### TP 1: Digitale Modelle und IT-Systeme

Das Teilprojekt 1 befasst sich mit der integrativen 3D-Modellierung von Bauwerk, Baugelände und Baugrund. Ein wesentlicher Aspekt der Forschungsarbeit liegt dabei in der Entwicklung objektorientierter Produktmodelle zur Erfassung von Geometrie, Semantik und Parametrik aller bei den betrachteten Bauwerken auftretenden Bauteile und anderer bauprozessrelevanter Entitäten (z. B. Bodenschichtung). Ein weiterer Schwerpunkt besteht in der Entwicklung weitgehend automatisierter Methoden zur Datenerhebung. Hierzu sollen neben der Verwendung parametrischer 3D-CAD-Werkzeuge zur Konstruktion von Bauwerksmodellen der Einsatz moderner Vermessungsmethoden, wie beispielsweise terrestrisches Laserscanning, zur Gewinnung eines 3D-Oberflächenmodells weiterentwickelt und Techniken zur Ableitung von 3D-Baugrundmodellen aus Bohrprofilen erarbeitet werden.

Durch die Verknüpfung des resultierenden 3D-Modells mit dem Bauzeitenplan kann ein 4D-Baustelleninformationsmodell generiert werden, das die Grundlage für die Bauablaufsimulationen und das Supply Chain Management bildet. Um den Anforderungen eines ganzheitlichen Ansatzes zum Baustellenmanagement an Verfügbarkeit und Variabilität eines solchen 4D-Modells zu genügen, soll dessen Verwaltung in einem kommerziell verfügbaren PDM-System erprobt werden.



## TP 2: Virtuelle Planung/Baufortschrittskontrolle/Controlling

Das Teilprojekt 2 beschäftigt sich mit den beiden globalen Themen der virtuellen Prozessplanung der Bauabläufe durch Ansätze der ereignisorientierten Ablaufsimulation sowie dem Controlling des realen Baufortschritts hinsichtlich Qualität, Leistung und Kosten. In der Arbeitsvorbereitung der Baustelle soll den Bauleitern bzw. den Projektverantwortlichen durch verschiedene Simulationsszenarien des Bauablaufs eine deutlich verbesserte Entscheidungsgrundlage für eine kosten- und zeitoptimale Bauabwicklung an die Hand gegeben werden. Durch die Koppelung der Realdaten an das virtuelle Modell können diese Ablaufszenarien auch während der Bauzeit aktualisiert werden, falls auf Grund von Witterungseinflüssen oder abweichender Baurandbedingungen, die im Vorfeld nur schwer zu prognostizierten sind, Änderungen der ursprünglichen Planung erforderlich werden.

Die Controllingaufgaben werden unter den drei Gesichtspunkten Leistungs-, Kosten- und Qualitätscontrolling der erbrachten Bauleistung betrachtet. Dabei werden sowohl Maschinendaten als auch zeitdiskrete 3D-Vermessungen der Baustelle zur Dokumentation des Baufortschritts und Gewinnung von prozessrelevanten Kennzahlen untersucht.

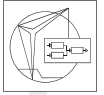
Durch die bereits beschriebene starke Verzahnung der Ablaufplanung und -simulation mit den Plan- und Realdaten ist es eine zentrale Aufgabe des zweiten Teilprojektes, ein speziell für die bauindustriellen Prozesse maßgeschneidertes PDM-System auf Basis von industriell verfügbaren Standardkomponenten zu entwickeln. Dieses soll einerseits alle relevanten Prozesse und Beteiligten abbilden, andererseits aber auch die heute im Baualltag verwendeten Datenformate insofern integrieren, als dass die Vision der durchgängigen Datennutzung stets im Fokus der Arbeiten steht. Hierzu sind eingehende Untersuchungen hinsichtlich verfügbarer, für den Maschinenbau optimierter Systeme notwendig, die an die spezifischen Anforderungen der Baubranche angepasst werden müssen.

## TP 3: Baulogistik

Das Teilprojekt „Baulogistik“ befasst sich mit der prozessübergreifenden Vernetzung der am Bauobjekt beteiligten Akteure auf den Ebenen des Material- und Güterflusses. Ein durchgängiger Supply Chain Management-Ansatz soll helfen, die Transparenz und Flexibilität der bauindustriellen Wertschöpfungsketten zu erhöhen. Im Rahmen der Baustelleneinrichtungsplanung und des Stoffstrommanagements werden Liefer- und Logistikstrategien für die Materialfluss- und Layoutgestaltung entwickelt.

Aufgrund ihrer Querschnittsfunktion ist die Baulogistik mit allen anderen Teilprojekten sehr stark vernetzt. Zu Teilprojekt 1 besteht eine Zusammenarbeit dahingehend, als dass die Geometriemodelle mit der virtuellen Baustelleneinrichtung kombiniert und entsprechend der verschiedenen Bauphasen angepasst werden. Auch bildet die Baulogistik die Grundlage für die Ablaufszenarien. Dabei liefert das Stoffstrommanagement die Eingangsfaktoren für die Simulation der Transportvorgänge, während die Supply Chain Management-Netzwerke sowohl eine frühzeitige Integration der Lieferanten in die virtuelle Baustellenplanung, als auch die Gestaltung des zugehörigen Leistungs- und Qualitätscontrollings ermöglichen. In enger Abstimmung mit Teilprojekt 4 werden schließlich die technischen Voraussetzungen für eine automatisierte Materialidentifikation und Materialflussverfolgung geschaffen. Die Baulogistik definiert die Identifikationspunkte im Bauprozess und hilft bei der Integration in das übergeordnete Datenverwaltungskonzept.

## TP 4: Identifikation/Lokalisierung/Steuerung



Im vierten Teilprojekt werden Methoden zur EDV-gestützten automatisierten Datenerfassung von qualitäts- und leistungsrelevanten Daten auf der Baustelle und deren Integration in das gesamte Datenhaltungskonzept untersucht. Somit soll der Mensch als potenzielle Fehlerquelle im Datenerfassungsprozess weitgehend von diesen Tätigkeiten entlastet werden, um sich auf seine Kernaufgaben konzentrieren zu können und gleichzeitig eine höhere Datenqualität zu erzielen.

Als innovativer Ansatz der Datenerfassung sollen hierzu Sensornetze für die Überwachung der Baumaschinen in einem Pilotversuch auf der Baustelle installiert werden. In Kombination mit speziell für den Baubereich angepassten Ident-Technologien können Material- und Transportströme auf der Baustelle überwacht und nachvollzogen werden.

Neben dem Tracking von Material sowie der Verfolgung von Stoffstromflüssen auf der Baustelle wird in diesem Teilprojekt auch die Erfassung und Weiterverarbeitung von Maschinendaten, wie beispielsweise Verdichtungsdaten der FDVK (flächendeckende Verdichtungskontrolle) von Walzen, definiert. In Bezug auf die Dokumentation des Baustellenlebenszyklus und der späteren Nutzung einer Vielzahl von Daten, beispielsweise aus den Erfassungspunkten im Bauprozess, ist ein allgemeingültiges, standardisierbares Gesamtkonzept zur Datenintegration in das virtuelle Baustellenmodell ein wichtiges Ziel dieses Teilprojekts, um die spätere Weiterverwendung der Forschungsergebnisse in der Praxis gewährleisten zu können.

## Mitglieder des Forschungsverbundes

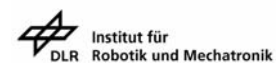
### Sprecher:

- Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner  
TU München; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)



### Wissenschaftliche Projektpartner:

- Prof. Dr. rer.nat. E. Rank  
TU München; Lehrstuhl für Computation in Engineering
- Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt  
TU München; Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
- Prof. Dr.-Ing. Gerd Hirzinger  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Robotik und Mechatronik
- Prof. P. Klaus, D.B.A./Boston Univ.  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Logistik
- Prof. Dr.-Ing. T. Euringer  
Hochschule Regensburg; Fakultät Bauingenieurwesen
- Prof. Dipl.-Ing. W. Stockbauer  
Hochschule Regensburg; Fakultät Bauingenieurwesen





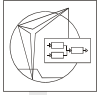
## Industriepartner:



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing.  
Willibald A. Günthner

Dipl.-Ing. Cornelia Klaubert  
Tel.: +49 (0) 89/289 159 73  
E-mail: [klaubert@fml.mw.tum.de](mailto:klaubert@fml.mw.tum.de)

Dipl.-Ing.  
Markus Schorr  
Tel.: +49 (0) 89/289 159 52  
E-mail: [schorr@fml.mw.tum.de](mailto:schorr@fml.mw.tum.de)



## **Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen**

---

### **1 Problemstellung**

In der Regel ist jedes Bauprojekt einzigartig, beispielsweise bzgl. seiner Lage, Konstruktion und Organisationsstruktur. Individuelle Projekte erfordern eine ebenso individuelle Art ihrer Ausführung, was sich insbesondere auf die Planung der Bauprozesse auswirkt. Neben den Ansprüchen des Bauherrn bzgl. Termine, Kosten, Qualität müssen ebenso projektspezifische Randbedingungen beachtet werden [1]. Die angesprochene Komplexität von Bauprojekten zeigt sich im Besonderen am Beispiel des Ausbaus, welcher aufgrund der Beteiligung einer Vielzahl unterschiedlicher Gewerke und ihrer variierenden Ansprüche an Umgebungs- bzw. Arbeitsbedingungen eine herausragende Stellung einnimmt. Aktuell sind insbesondere die Prozesse des Ausbaus durch eine Vielzahl von Störungen und gegenseitiger Behinderungen der Beteiligten geprägt. Vor Ort ist ein großer Koordinierungsaufwand notwendig, um auf resultierende Störungen adäquat zu reagieren und die Konsequenzen auf die aktuelle Termin- und Ressourcenplanung zu minimieren. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist eine umfangreiche Untersuchung von Ausführungsprozessen unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen und Alternativen äußerst sinnvoll, um mit Hinblick auf die angestrebten Projektziele eine annähernd optimale und Störungen gegenüber robuste Lösung für den Bauproduktionsablauf zu ermitteln.

In der stationären Industrie hat sich die Planung mittels Computertechnik bereits in den 90er Jahren etabliert. Hier finden diskrete ereignis-orientierte Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung Anwendung und ermöglichen die Optimierung von Terminen und Ressourcen sowie die 3D-Visualisierung von Prozessen und Störungen [3]. Zur Verbesserung der Ausführungsplanung können auch im Bauwesen entsprechende Simulationsmodelle verwendet werden. Die Simulation von Bauprozessen ermöglicht eine detaillierte und realistische Planung der Prozesse, liefert eine fundierte Entscheidungsgrundlage und stellt somit eine verbesserte Kommunikationsbasis der Beteiligten dar. Des Weiteren können robuste Prognosen mit Hilfe der Simulation getroffen werden [3].

Im Rahmen der Kooperation SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering) [5][6] beschäftigen sich Mitarbeiter der Bauhaus-Universität Weimar und der Flensburger Schiffbau Gesellschaft mbh & Co.KG (FSG) mit Konzepten zur Verbesserung der Ausbauplanung und deren Umsetzung. Die FSG entwickelt mit ihren Partnern der SimCoMar-Gemeinschaft (Simulation Cooperation in the Maritime Industries) [7][3] bereits seit mehreren Jahren verschiedene Simulationsbausteine zur effizienten Modellierung komplexer Produktionssysteme. Das Ergebnis ist das Simulation Toolkit Shipbuilding (STS), eine Bausteinbibliothek flexibler und parametrisierbarer Simulationskomponenten zur Modellierung komplexer Fertigungsstraßen. Die bisherigen Simulationsumgebungen und vorhandenen Simulationsbibliotheken sind jedoch nur bedingt geeignet zur Modellierung von komplexen und dynamischen Prozessen sowie sich ändernden Randbedingungen, wie sie beispielsweise bei Ausbauprozessen vorhanden sind. Innerhalb der Kooperation SIMoFIT sollen daher neuartige flexible Möglichkeiten zur Abbildung und Simulation von Ausbauprozessen im Schiffbau und Bauwesen entwickelt werden.



Der Forschungsansatz der Kooperationspartner beinhaltet die Forderungen nach:

- einer flexiblen und schnellen Modellierung der projektspezifischen Randbedingungen,
- die Berücksichtigung sich ändernder Arbeitsplätze, Lagerplätze und Transportwege, um die Dynamik des Baufortschritts adäquat abbilden zu können,
- zudem die Abbildung und Untersuchung etablierter Ausführungsstrategien.

Der umgesetzte Modellierungsansatz basiert auf den Prinzipien des Constraint Satisfaction [8].

## 2 Constraint Satisfaction

Ein Constraint Network wird durch das Triple  $(X, D, C)$  definiert [9][10]:

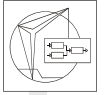
- $X$  beschreibt die Menge der Variablen z. B. Aktivitäten, Personal, Geräte etc.
- $D$  beschreibt eine Menge gültiger Wertebereiche der Variablen.
- $C$  beschreibt die Menge der Randbedingungen oder Restriktionen zwischen den Variablen.

Das Constraint Satisfaction Problem (CSP) eines Constraint Networks besteht darin, eine gültige Wertebelegung der Variablen zu finden, bei der alle den Variablen zugewiesenen Constraints erfüllt sind [9][11]. Um Probleme realistischer beschreiben zu können, ist es jedoch sinnvoll, die Menge der Constraints in Hard Constraints (HC) und Soft Constraints (SC) zu unterscheiden [12][13][14]. Hard Constraints beschreiben zwingende Bedingungen des Bauablaufs und sind folglich immer einzuhalten. Hierzu zählen beispielsweise technologische Reihenfolgen innerhalb oder zwischen Gewerken. Im Gegensatz hierzu beschreiben Soft Constraints zweckmäßige Abhängigkeiten, z. B. Produktivität, Ablaufstrategien. Diese müssen nicht vollständig erfüllt sein, sondern können in einem definierten Rahmen verletzt werden. Das resultierende Problem wird als Partial Constraint Satisfaction Problem (PSCP) bezeichnet und besteht nunmehr darin, eine gültige Wertebelegung der Variablen zu finden, bei der alle den Variablen zugewiesenen Hard Constraints erfüllt sind und die Soft Constraints so wenig wie möglich verletzt werden [11].

Für die Simulation von Bauprozessen wurden bislang folgende Constraints definiert [6][15][16]:

Hard Constraints	
Technologische Zwangsfolge	Zwingend erforderliche Reihenfolge zwischen zwei Vorgängen
Kapazität	Anzahl / Qualifikation der notwendigen Arbeiter und Arbeitsmittel
Verfügbarkeit	Notwendiges Material unter Berücksichtigung von vorhandenen Lagerflächen
Sicherheitskriterien	Sicherheitsabstände, Begrenzte Ausführungsdauern
Soft Constraints	
Produktivität	Verhältnis zwischen Produktivität und verfügbarem Arbeitsplatz [17][18]
Strategien	Sinnvolle und bewährte lokale und globale Fertigungsstrategien [19]

### 3 Simulationsansatz



Das Simulationskonzept basiert auf der Simulation einzelner Arbeitsschritte. Jede Bauaufgabe wird in einzelne Arbeitsschritte zerlegt. Jeder Arbeitsschritt besitzt einen Zustand (nicht begonnen, begonnen, beendet), der Aufschluss über seine Bearbeitungsstatus gibt. Jeder Schritt wird ohne Unterbrechung und ohne Änderung der zugewiesenen Ressourcen oder Arbeitsplätze ausgeführt. Die Simulation läuft sukzessive innerhalb der Simulationsschritte „Starten von Worksteps“ und „Stoppen von Worksteps“ ab.

#### Starten von Worksteps

Auslöser eines Simulationsschrittes ist immer ein neues Ereignis. Nach dem Eintritt eines Ereignisses werden alle nicht begonnenen Arbeitsschritte auf die Erfüllung ihrer Hard Constraints hin überprüft. Diejenigen Arbeitsschritte, die ihre HC erfüllen, werden als nächste Ausführbare zwischengespeichert. Nur diese Schritte werden anschließend auf die Erfüllung ihrer Soft Constraints hin überprüft und dementsprechend geordnet. Derjenige Arbeitsschritt, der seine Soft Constraints am „Besten“ erfüllt, wird gestartet. Das für seine Ausführung benötigte Material, Personal oder Arbeitsmittel werden gesperrt und stehen nicht mehr für die Ausführung weiter Schritte zur Verfügung. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis zum aktuellen Simulationszeitpunkt kein weiterer Schritt gestartet werden kann.

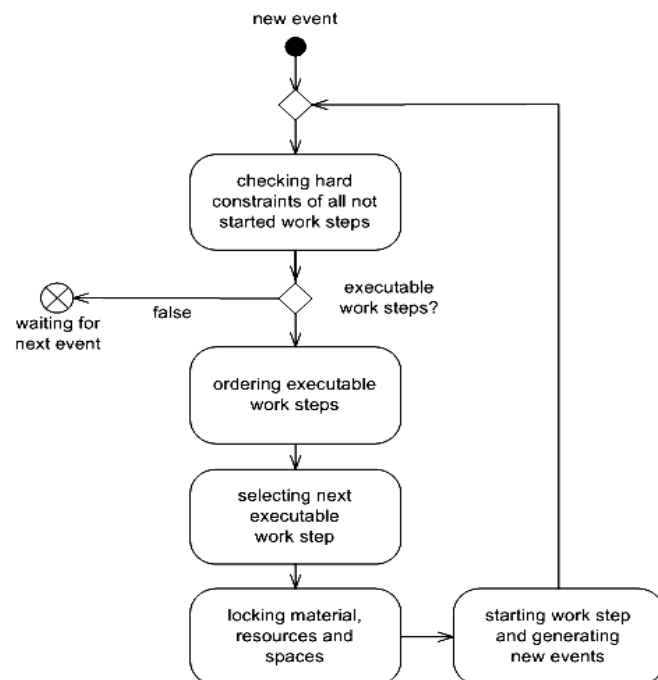


Bild 1 UML-Aktivitätsdiagramm „Starten von Worksteps“

#### Stoppen von Worksteps

Ist die geplante Ausführungszeit eines Arbeitsschrittes erreicht, so wird der Status des Schrittes auf „beendet“ gesetzt und alle durch seine Ausführung gesperrten Ressourcen bzw. Arbeitsplätze werden wieder freigegeben.

Beide Simulationsschritte werden so lange wiederholt, bis alle Arbeitsschritte beendet sind oder im Fehlerfall keine Arbeitsschritte mehr gestartet werden können. Jeder Simulationslauf mit allen Zustandsänderungen bzw. Sperrungen wird protokolliert. Somit kann ein Terminplan erstellt und die Auslastung der Ressourcen analysiert werden.

## 4 Implementierung



Das vorgestellte Constraint-basierte Simulationskonzept wurde innerhalb einer diskreten ereignis-orientierten Simulationsumgebung *Plant Simulation* der Firma Siemens PLM umgesetzt [20]. Unter Verwendung des Simulationsbaustein Kastens für den Schiffbau [7] konnten erste Ansätze zur Simulation von Ausbauprozessen schnell verwirklicht werden, da der STS bereits eine umfassende Bibliothek an wiederverwendbaren und parametrisierbaren Komponenten, z. B. für die Bereiche Logistik, Material, Transport, Ausrüstung etc., liefert, die zu komplexen Simulationsmodellen zusammengefügt werden können (siehe Bild 2).

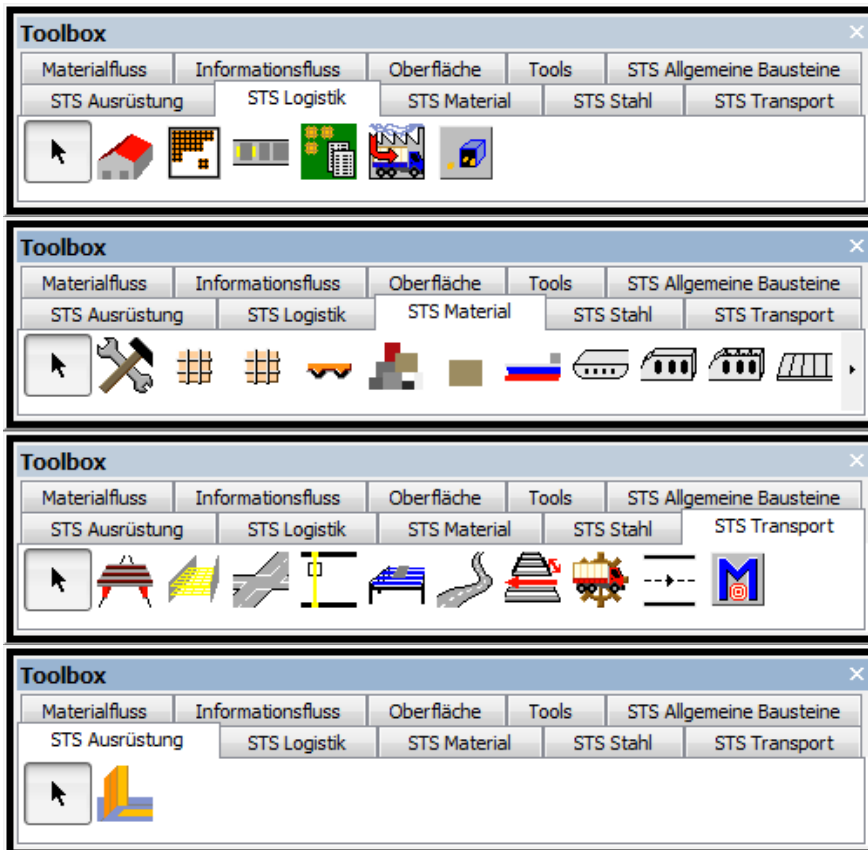


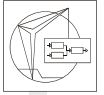
Bild 2 Simulationskomponenten des STS (Simulation Toolkit Shipbuilding)

Die Umsetzung des vorgestellten Constraint-basierten Simulationsansatzes erforderte auch die Neuentwicklung von speziellen Bausteinen. Beispielsweise wurde eine spezielle Simulationskomponente zur Genierung, Verwaltung und Überprüfung der Hard und Soft Constraints implementiert [6]. Die einzelnen Komponenten zur Aufstellung eines Constraint-basierten Simulationsmodells werden im Folgenden vorgestellt.

### Materialverwaltung

Mit Hilfe des Bausteins Materialverwaltung werden die Materialien des Modells verwaltet. Mit Hilfe eines speziellen Bausteins werden die Materialien als eigenständige Objekte erzeugt. Während der Simulation werden zunächst alle verfügbaren bzw. angelieferten Materialien bei der zentralen Materialverwaltung angemeldet. Die Materialinformationen, z. B. Materialtyp, Abmaß, Anzahl und die aktuelle Lagerposition, werden von der Materialverwaltung protokolliert. Die Materialverwaltung wird bei der Überprüfung der Hard Constraints genutzt. Für jeden Arbeitsschritt wird eine Anfrage auf Verfügbarkeit des Materials an die Materialverwaltung gestellt. Ist das erforderliche Material vorhanden bzw. bei ihr





angemeldet, ist diese Bedingung erfüllt. Die aktuelle Lagerposition des Materials kann mit Hilfe der Materialverwaltung ermittelt werden.

### **Ressourcenverwaltung**

Die Ressourcenverwaltung übernimmt die Verwaltung des Personals und der verfügbaren Geräte. Sie protokolliert die zugehörigen Informationen der Ressourcen, z. B. die Personalqualifikation und Anzahl, Gerätekapazität und Dimensionen. Die Ressourcenverwaltung wird bei der Überprüfung der Hard Constraints genutzt. Für jeden Arbeitsschritt wird eine Anfrage auf Kapazität der Ressourcen an die Ressourcenverwaltung gestellt – ist qualifiziertes Personal bzw. ausreichend dimensionierte Geräte vorhanden und einsetzbar? Ist diese Bedingung erfüllt und auch alle weiteren Hard Constraints, wird der Schritt zur Ausführung vorgemerkt. Beim Start des Schrittes sperrt die Ressourcenverwaltung die benötigten Ressourcen für die Ausführung des Schrittes und gibt diese, sobald die Bearbeitung beendet ist, wieder frei. Aktuell sind nur Arbeiter mit ihren entsprechenden Qualifikationen als Ressourcen implementiert.

### **Bereichsverwaltung**

Über die Bereichsverwaltung wird das Raumangebot, d. h. die verfügbaren Arbeits- und Lagerflächen, verwaltet. Eine Arbeitsebene, z. B. ein Geschoss, wird mit Hilfe eines Bereichs dargestellt. Alle Arbeitsschritte werden auf dem Bereich ausgeführt, so dass dieser die unterschiedlichen Charakteristiken von Arbeits-, Lager- und Transportflächen abbilden können muss. Der Bereich wird mit Hilfe eines regelmäßigen rechteckigen Rasters modelliert, mit dessen Hilfe die Prüfung der verfügbaren Flächen erfolgt. Eine Zelle kann unterschiedliche Zustände annehmen, z. B. frei, belegt, gesperrt für Lagerung etc. Vor der Durchführung eines Arbeitsschrittes bzw. eines Transports wird überprüft, ob für die Ausführung dieser Aufgabe die benötigten Zellen frei oder belegt sind. Nur wenn alle Zellen frei sind, kann der Schritt zur Ausführung vorgemerkt und in die Liste der nächsten ausführbaren Schritte eingetragen werden.

### **Transportsteuerung**

Die Transportsteuerung verwaltet die Transportmittel und protokolliert die Informationen zu Anzahl, Kapazität und ihrer Verwendung. Zudem bearbeitet sie die eingehenden Transportanfragen und prüft diese auf Ausführbarkeit. Zunächst ist die Einsatztauglichkeit der vorhandenen Transportmittel zu prüfen, sowie die Freiheit des Transportweges, z. B. vom Materiallagerort zum Einbauort (siehe auch Materialverwaltung und Bereichsverwaltung). Sind diese Bedingungen der Kapazität und Verfügbarkeit erfüllt, kann der Transportvorgang starten. Erst wenn der Transport des Materials erfolgreich beendet wurde, kann der anfordernde Schritt gestartet werden.

### **Constraint-Verwaltung**

Die Constraint-Verwaltung generiert aus den Eingangsdaten die auszuführenden Arbeitsschritte und die Constraints zwischen diesen Arbeitsschritten. Bei Eintritt eines neuen Ereignisses erfolgt die Prüfung aller nicht begonnenen Arbeitsschritte auf die Erfüllung ihrer Constraints (siehe Abschnitt 3). Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe der Methoden der Constraint-Verwaltung. Zur Überprüfung der Constraints Verfügbarkeit, Kapazität, Sicherheit sendet die Constraint-Verwaltung Anfragen an die Material-, Ressourcen- und Bereichsverwaltung. Die Überprüfung der technologischen Reihenfolgen erfolgt anhand der intern generierten Constraints zwischen den Arbeitsschritten. Diejenigen Arbeitsschritte die alle Constraints erfüllen, werden in einer Liste als nächste ausführbare zwischengespeichert und ein ausgewählter Schritt an die Montagesteuerung zum Start übergeben.



## Montagesteuerung

Die Montagesteuerung bildet den Kern eines jeden Simulationsmodells und besitzt eine Verbindung zu allen vorgestellten Komponenten. Mit Hilfe dieser Komponente werden die Arbeitsschritte gestartet und beendet. Hierzu stellt die Montagesteuerung u. a. die notwendigen Transportanfragen an die Transportverwaltung, welche die Möglichkeit der Ausführung bzgl. Verfügbarkeit an Transportmitteln und -weg prüft. Die benötigten Ressourcen werden bei der Ressourcenverwaltung angefragt, sowie die Materialien bei der Materialverwaltung. Sind diese Voraussetzungen erfüllt und mit Hilfe der Constraint-Verwaltung die Ausführbarkeit des Arbeitsschrittes überprüft, werden von der Montagesteuerung der benötigte Transportweg, Arbeits- und/oder Lagerbereich für den Schritt gesperrt und der Schritt gestartet. Bei Beendigung des Schrittes erfolgt eine Rückmeldung an die Komponenten, um die Ressourcen bzw. Flächen wieder frei zu geben. Das Zusammenspiel der Montagesteuerung mit den anderen Simulationsbausteinen ist in Bild 3 dargestellt.

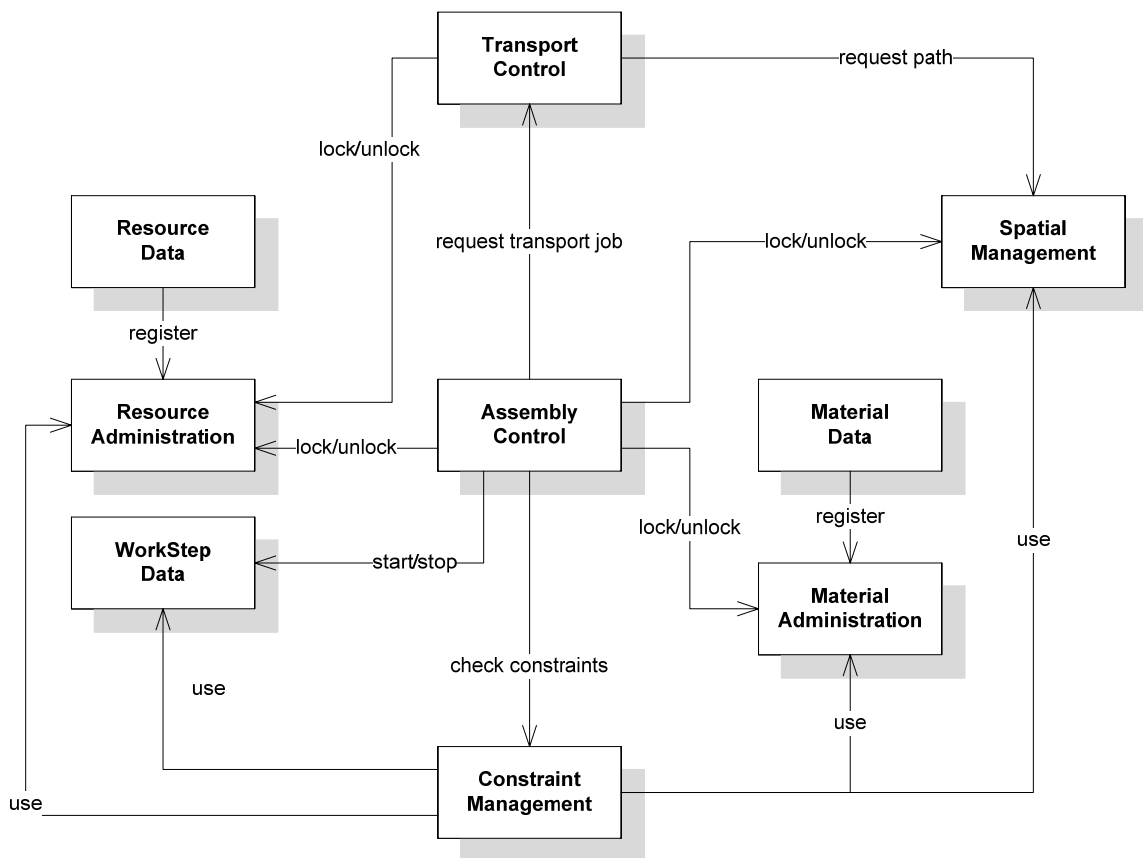


Bild 3 Schematischer Zusammenhang zwischen den einzelnen Simulationsbausteinen

## 5 Eingangsdaten

Die Effizienz der Simulationsmodelle und daraus resultierend die Anwendbarkeit der Modelle hängt sehr stark von der Qualität und dem Detaillierungsgrad der Eingangsdaten ab. Die Definition bzw. Generierung von zweckmäßigen Eingangsdaten ist aktuell noch sehr aufwendig, da CAD-Modelle häufig nicht die notwendigen Details für eine Simulation enthalten, so dass bislang ein Großteil der Daten manuell erzeugt werden muss.

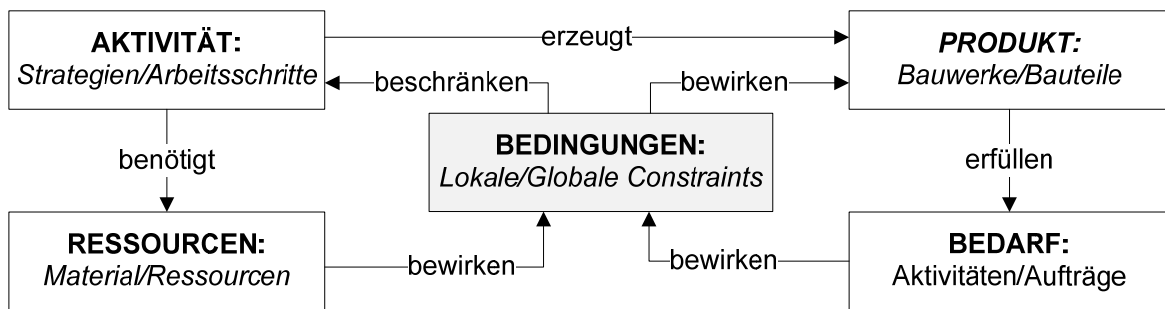


Bild 4 Ontologie der Produktionsprozesse (nach [21])

Die Klassifizierung der Daten zur Simulation von Ausbauprozessen erfolgte in Anlehnung an die Ontologie von SMITH und BECKER (vgl. [21]) in die Gruppen:

- Bauwerke, Bauteile (Produkt),
- Aktivitäten, Aufträge (Bedarf),
- Baubereiche/Bauplätze,
- Strategien/Arbeitsschritte (Aktivitäten),
- Material, Ressourcen (Ressourcen),
- Randbedingungen (Constraints).

Die Beachtung der Bauplätze erscheint als Erweiterung zu der angegebenen Ontologie aufgrund der dynamischen Charakteristik der Bauprozesse und dem Anspruch an ein detailliertes und realistisches Modell unabdingbar (siehe Bild 4).

### Bauwerke/Bauteile

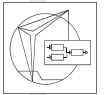
Bauwerke beschreiben einen bestimmten realen Bedarf, beispielsweise eine Wand. Diese Wand besitzt eine geometrische Abmessung, eine Position auf dem **Bauplatz** und wird durch ihre einzelnen **Bauteile** detailliert beschrieben. Zur Herstellung der Bauwerke kann eine Strategie über die Abfolge der Bearbeitungsschritte (Arbeitsschritte) definiert werden. Bauwerke besitzen die Eigenschaft, dass sie durch andere Bauwerke hierarchisch aufgebaut werden können. Bauteile werden zur Herstellung des Bauwerks benötigt, z. B. Bauplatte, Fertigteil etc. Jedes Bauteil besitzt daher eine Position relativ zum zugehörigen Bauwerk und einen eindeutigen Teiletyp (siehe Material).

### Aktivitäten/Aufträge

Aktivitäten beschreiben eine logische Zusammenfassung von größeren Fertigungseinheiten, z. B. Herstellung einer Halle, Herstellung eines Geschosses etc. Für jede Aktivität kann zu seiner Erfüllung ein oder mehrere Aufträge (Bauwerke) definiert werden. Das Material für eine Aktivität wird immer von einer Materialverwaltung verwaltet. Aufträge definieren die Arbeiten, die zur Herstellung genau eines Bauwerks, z. B. Wand, erforderlich sind. Hierzu kann für jeden Auftrag bzw. jedes Bauwerk eine Herstellungsstrategie definiert werden (siehe Arbeitsschritte).

### Baubereiche/Bauplätze

Ein Baubereich (Bauplatz) definiert einen bestimmten Produktionsort, z. B. Geschoss, Feuerzone etc. Die Bauwerke können nur auf definierten Baubereichen hergestellt werden. Die Baubereiche ermöglichen die Lagerung, Montage und den Transport von Bauteilen. Hierfür besitzt jeder Bereich eine lokale Materialverwaltung sowie Materialsteuerung.





## Strategien/Arbeitsschritte

Zur Verarbeitung eines Bauteiltyps, z. B. UW-Profil, können verschiedene allgemeine Bearbeitungsschritte definiert werden, z. B. Profil zuschneiden oder anschrauben. Ein zugehöriger Arbeitsschritt zu einem Teiletyp wird durch die notwendige Personalqualifikation, die benötigte Anzahl von Mitarbeitern und die Ausführungsdauer beschrieben. Die Möglichkeit der Definition alternativer Ausführungsvarianten an einem Bauteiltyp kann mit Hilfe unterschiedlicher Montagestrategien beschrieben werden. In Abhängigkeit vom Bauteiltyp und der Montagestrategie werden die Arbeitsschritte zur Montage aller Teile dieses Teiletyps automatisch generiert.

## Material/Ressourcen

Zur Herstellung der Bauwerke werden Materialelemente benötigt. Ein Materialelement definiert sich durch seinen Teiletyp und seine Abmessungen. Des Weiteren können auch Liefertermine sowie Verpackungseinheiten zur näheren Beschreibung definiert werden. Alle Materialelemente werden mit Hilfe einer globalen Materialverwaltung verwaltet.

Die Menge der Ressourcen, welche zur Ausführung der Arbeiten bzw. Vorleistungen auf diese benötigt werden, unterteilt sich in Personal und Transportmittel. Personal wird mit Hilfe der Personalsteuerung definiert, z. B. Anzahl, Qualifikation, Schichten; Transportmittel mit Hilfe einer Transportsteuerung, z. B. Typ, Anzahl. Sowohl Personalsteuerung als auch Transportsteuerung übernehmen die Verwaltung der Ressourcen- und Transportanfragen. Für spezielle Ressourcen gibt es spezielle Bausteine, z. B. Kran, Schweißanlage.

## Randbedingungen

Die Randbedingungen der Produktion bzw. der Arbeitsschritte werden durch lokale und globale Constraints beschrieben. Lokale Constraints definieren Reihenfolgen zur Herstellung eines Bauwerks, z. B. Profil „zuschneiden“ vor Profil „montieren“, alle Profile „montieren“ vor allen Bauplatten „montieren“. Globale Constraints definieren Reihenfolgen zur Herstellung mehrerer Bauwerke, z. B. Wand A vor Wand B fertigstellen.

Ein sinnvoller Ansatz zur Generierung geeigneter Eingangsdaten zur Simulation ist die Implementierung von Datengeneratoren für spezielle Ausbauprozesse. Im Rahmen aktueller Arbeiten wird ein Generator für Arbeitsschritte, Material, Constraints, Montageposition und Arbeitsplätze für Trockenbauwände umgesetzt.

## 6 Montage einer Fertigteilhalle

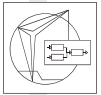
Am Beispiel der Montage einer Fertigteilhalle soll der Aufbau eines Constraint-basierten Simulationsmodells unter Verwendung der entwickelten Simulationskomponenten veranschaulicht werden. Die Halle besteht aus Köcherfundamenten, Frostriegeln, Stützen und Bindern. Zur Montage dieser Elemente steht ein Baukran zur Verfügung, welcher die Fertigteile zunächst in ein Zwischenlager transportieren soll. Zum Start der Montage sind die Elemente mit Hilfe des Krans an ihren Einbauort zu transportieren, wo sie in einer vorgegebenen technologischen Reihenfolge einzubauen sind.

Die folgenden Elemente sollen montiert werden:

- 12x Köcherfundamente
- 12x Frostriegel
- 12x Stützen
- 5x Binder

Die Montage der Elemente soll in der folgenden Reihenfolge vorgenommen werden. Zunächst sind die Köcherfundamente zu montieren. Anschließend werden die Frostriegel und die Stützen eingebaut. Im

Anschluss an den Einbau der Stützen ist eine Trocknungsphase vorzusehen, bevor die Montage der Binder gestartet werden kann.



## 6.1 Simulationskomponenten

Zur Modellierung des vorgestellten Beispiels werden folgende Simulationskomponenten des STS (Simulation Toolkit Shipbuilding) verwendet: Ereignisverwalter zum Starten und Stoppen des Simulationslaufs; Auftragsgenerator zur Verwaltung der einzelnen Fertigteilaufträge; ConstraintManagement zur Erzeugung der Arbeitsschritte und Constraints sowie zur Ausführung der Aufträge; RessourcenManagement zur Verwaltung der Ressourcen; MaterialAdministration zur Verwaltung der Materialinformationen; Lieferant zur Erstellung und Lieferung der Materialien; TransportControl zur Koordination der Transportmittelanfragen; Lager zur Lagerung des Material; Baubereich zur Definition von Montagepositionen; Baukran zum Transport der Materialien. Die Simulationskomponenten Lager, Baubereich und Baukran sind entsprechend ihrer Positionen in das Simulationsmodell einzusetzen (siehe Bild 5).

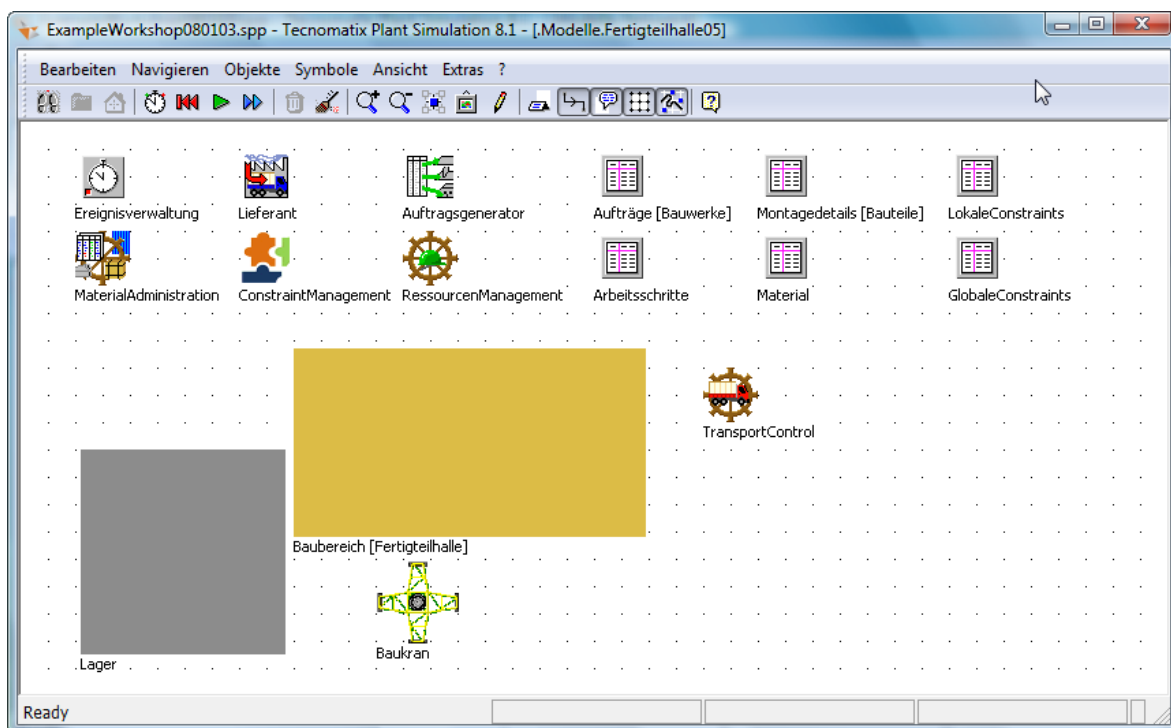


Bild 5 Komponenten für die Simulation der Montage einer Fertigteilhalle

## 6.2 Eingangsdaten

Aufbauend auf der vorgestellten Klassifikation (siehe Abschnitt 5) werden im nächsten Schritt die entsprechenden Eingangsdaten spezifiziert. Im Rahmen dieses Beispiels wird nur eine Aktivität zur Montage der Fertigteilhalle definiert. Diese Aktivität „Montage Fertigteilhalle“ unterteilt sich in die Aufträge für die Montage der Köcherfundamente, Frostriegel, Stützen und Binder. Für jedes Fertigteil werden ein eigener Auftrag sowie ein eigenes Bauwerk mit entsprechendem Bauwerkstyp spezifiziert. In diesem vereinfachten Beispiel besteht jedes Bauwerk genau aus einem Bauteil. Für jeden Bauteiltyp wird eine Montagestrategie mit allgemeinen Arbeitsschritten zur Bearbeitung des Bauteils angegeben. Die gewünschte Reihenfolge der Bearbeitungsschritte wird separat als lokale Randbedingung definiert. Die Eingangsdaten werden im Modell mit Hilfe der Tabellen Auftragstabelle, Montagedetails, Arbeitsschritte, Material, Lokale und Globale Constraints verwaltet.



## Auftragstabelle

In der Auftragstabelle werden die einzelnen Aufträge bzw. Bauwerke definiert. Hierzu werden die übergeordnete Aktivität, eine Bezeichnung, ein Bauwerkstyp sowie ein Bauplatz angegeben. In Bild 6 sind einige Aufträge dargestellt. Durch die Angabe von Abmessungen sowie relativen Einbaupositionen werden die geometrischen Aspekte der Aufträge festgelegt. Über die Angabe einer Montagestrategie-nummer wird definiert, welche Arbeitsschritte verwendet werden sollen. Die Arbeitsschritte werden in der Arbeitsschrittabelle festgelegt.

	datetime 1	string 2	string 3	string 4	length[m] 5	length[m] 6	length[m] 7	length[m] 8	length[m] 9	length[m] 10	integer 11	object 12
string	Startdate	Activity	Bauwerk	Bauwerkstyp	Länge	Breite	Höhe	PosX	PosY	PosZ	Strategie	Bauplatz
2	02.01.2007 08:00	Fertigteilhalle	Binder1	Binder	12	0.4	1.6	0.9	6.9	8.6	4	Baubereich
3	02.01.2007 08:00	Fertigteilhalle	Köcherfundament11	Köcherfundament	1.8	1.8	1.2	0.9	0.9	-0.6	1	Baubereich
4	02.01.2007 08:00	Fertigteilhalle	Köcherfundament12	Köcherfundament	1.8	1.8	1.2	6.9	0.9	-0.6	1	Baubereich
5	02.01.2007 08:00	Fertigteilhalle	Frostriegel1112	Frostriegel	5	0.2	1.2	3.9	0.9	-0.6	2	Baubereich
6	02.01.2007 08:00	Fertigteilhalle	Frostriegel1213	Frostriegel	5	0.2	1.2	9.9	0.9	-0.6	2	Baubereich

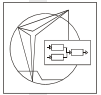
Bild 6 Aufbau der Auftragstabelle

## Materialdaten

In der Materialliste werden die zur Verfügung stehenden Materialien des Modells aufgeführt. Die Angabe eines genauen Liefertermins ist möglich. Die verschiedenen Teiletypen werden bzgl. ihrer Anzahl und Abmaße spezifiziert. Des Weiteren kann optional ein Lagerplatz nach der Anlieferung definiert werden.

	datetime 1	string 2	integer 3	length[m] 4	length[m] 5	length[m] 6	object 7
string	DeliveryTime	Teiletyp	Quantity	Länge	Breite	Höhe	StorageArea
1	02.01.2007 07:00	Binder	5	12	0.4	0.6	Außenlager
2	02.01.2007 07:00	Köcherfundament	12	1.8	1.8	1.2	Außenlager
3	02.01.2007 07:00	Frostriegel	12	5	0.2	1.2	Außenlager
4	02.01.2007 07:00	Stütze	12	9	0.4	0.4	Außenlager

Bild 7 Aufbau der Materialdatentabelle



## Arbeitsschritttabelle

Die Ausführung der Bauwerke, z. B. Stütze, Binder, kann in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen. Die Bearbeitungsschritte zu den verschiedenen Ausführungsvarianten werden in der so genannten Arbeitsschritttabelle definiert. Jede Ausführungsstrategie wird durch eine eindeutige Montagestrategienummer gekennzeichnet. Alle Bearbeitungsschritte zu verschiedenen Bauteilen einer Strategie werden separat aufgelistet. In diesem Beispiel besitzen die Bauteile Köcherfundament, Frostriegel und Binder nur einen Bearbeitungsschritt „einbauen“. Das Bauteil Stütze benötigt zur Montage zwei Bearbeitungsschritte „einbauen“ und „trocknen“. Für jeden Bearbeitungsschritt können notwendige Qualifikationen, die Anzahl der benötigten Arbeiter (min., max.), eine feste oder variable Bearbeitungsdauer und ein Transportmittel definiert werden. Das Transportmittel wird verwendet, um das entsprechende Bauteil von seinem aktuellen Lagerungsort zum Einbauort zu transportieren. Des Weiteren kann spezifiziert werden, ob das Transportmittel während der Bearbeitung des entsprechenden Schrittes verwendet bzw. aufgehalten wird.

	integer 1	string 2	string 3	string 4	integer 5	integer 6	time 7	object 8	boolean 9
string	Strategie	Schritt	Teiletyp	Qualifikation	ArbeiterMin	ArbeiterMax	Zeit	Transportmittel	TransportmittelAufhalten
1	1	einbauen	Köcherfundamen	Montage	2	2	10:00.0000	Baukran	true
2	2	einbauen	Frostriegel	Montage	2	2	15:00.0000	Baukran	true
3	3	einbauen	Stütze	Montage	2	2	20:00.0000	Baukran	true
4	3	trocknen	Stütze	Montage	2	2	2:00:00.0000	Baukran	false
5	4	einbauen	Binder	Montage	3	3	30:00.0000	Baukran	true

Bild 8 Aufbau der Arbeitsschritttabelle

## Montagedetails

Ein Bauwerk zu einer Aktivität besteht in der Regel aus mehreren Bauteilen. In der Tabelle Montagedetails werden für jedes Bauteil eines Bauwerks die exakten Einbaupositionen spezifiziert. Jedes Bauteil besitzt relativ zu dem Bauwerk eine konkrete Einbauposition und einen entsprechenden Einbauwinkel.

	string 1	string 2	string 3	length[m] 4	length[m] 5	length[m] 6	real 7	real 8	real 9
string	Aktivität	Bauwerk	Teiletyp	PosX	PosY	PosZ	WinkelX	WinkelY	WinkelZ
8	Fertigteilhalle	Frostriegel1213	Frostriegel	2.5	0.1	0	0.00	0.00	0.00
9	Fertigteilhalle	Frostriegel1314	Frostriegel	2.5	0.1	0	0.00	0.00	0.00
10	Fertigteilhalle	Frostriegel1415	Frostriegel	2.5	0.1	0	0.00	0.00	0.00
11	Fertigteilhalle	Frostriegel1525	Frostriegel	2.5	0.1	0	0.00	0.00	0.00
12	Fertigteilhalle	Frostriegel2131	Frostriegel	2.5	0.1	0	0.00	0.00	0.00

Bild 9 Aufbau der Montagedetailstabelle



## Lokale Constraints

In der Lokalen Constraints Tabelle wird die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte einer Montagestrategie festgelegt. Durch die Definition von bedingten Schritten und bedingenden Schritten wird eine Abfolge der Montagestrategie beschrieben. Die Vorbedingungen (*TeiletypC*, *SchrittC*) eines Bearbeitungsschrittes (*Teiletyp*, *Schritt*) müssen vollständig bearbeitet sein, bevor dieser Schritt ausgeführt werden kann. Zur Bearbeitung von Stützen ist die Montagestrategie 3 angegeben, demnach muss der Schritt „einbauen“ der Stütze beendet sein, bevor der Schritt „trocknen“ der Stütze begonnen werden kann.

	integer 1	string 2	string 3	string 4	string 5
string	Strategie	Teiletyp	Schritt	TeiletypC	SchrittC
1	3	Stütze	trocknen	Stütze	einbauen
2					
3					

Bild 10 Aufbau der Tabelle zur Beschreibung von lokalen Constraints

## Globale Constraints

Die Tabelle Globale Constraints ermöglicht die Definition von Bearbeitungsreihenfolgen zwischen unterschiedlichen Bauwerkstypen und deren Schritten. Ähnlich dem Aufbau der Tabelle Lokale Constraints wird unterschieden zwischen bedingenden und bedingenden Elementen. Das globale Constraint in Bild 11, Zeile 1 spezifiziert beispielsweise, dass alle Schritte „einbauen“ der Köcherfundamente vollständig bearbeitet sein müssen, bevor die Schritte „einbauen“ der Frostriegel begonnen werden können. Globale Constraints können auch zwischen bestimmten Bauwerken definiert werden. Beispielsweise wurde definiert, dass der Schritt „einbauen“ des Bauwerks Stütze11 erst begonnen werden kann, wenn die Schritte „einbauen“ der Bauwerke Köcherfundament11, Frostriegel1112 und Frostriegel1121 beendet wurden (siehe Bild 11, Zeile 2-4).

	string 1	string 2	string 3	string 4	string 5	string 6	string 7	string 8
string	Bauwerkstyp	Bauwerk	Teiletyp	Schritt	BauwerkstypC	BauwerkC	TeiletypC	SchrittC
1	Frostriegel		Frostriegel	einbauen	Köcherfundament		Köcherfundament	einbauen
2	Stütze	Stütze11	Stütze	einbauen	Köcherfundament	Köcherfundament11	Köcherfundament	einbauen
3	Stütze	Stütze11	Stütze	einbauen	Frostriegel	Frostriegel1112	Frostriegel	einbauen
4	Stütze	Stütze11	Stütze	einbauen	Frostriegel	Frostriegel1121	Frostriegel	einbauen

Bild 11 Aufbau der Tabelle zur Beschreibung von globalen Constraints



### 6.3 Kopplung der Simulationskomponenten

Nach der Erstellung der Simulationskomponenten und der Definition der Eingangsdaten müssen diese Elemente noch gekoppelt und parametrisiert werden. Dem Auftragsgenerator wird die Auftragstabelle mit Hilfe eines entsprechenden Dialogs zugeordnet (siehe Bild 12). Dadurch wird gewährleistet, dass beim Start eines Simulationslaufs, die entsprechenden Aufträge bzw. Bauwerke erstellt und für die Montage auf dem definierten Baubereich vorbereitet werden. Dem Lieferanten wird die Materialliste als Quelltablette zugeordnet und die entsprechenden Pack- bzw. Transportkriterien festgelegt (siehe Bild 12). Die Materialien werden somit zum definierten Liefertermin zur Baustelle geliefert, abgeladen und gelagert. Bei der Anlieferung werden die einzelnen Materialien bei der Materialverwaltung angemeldet.

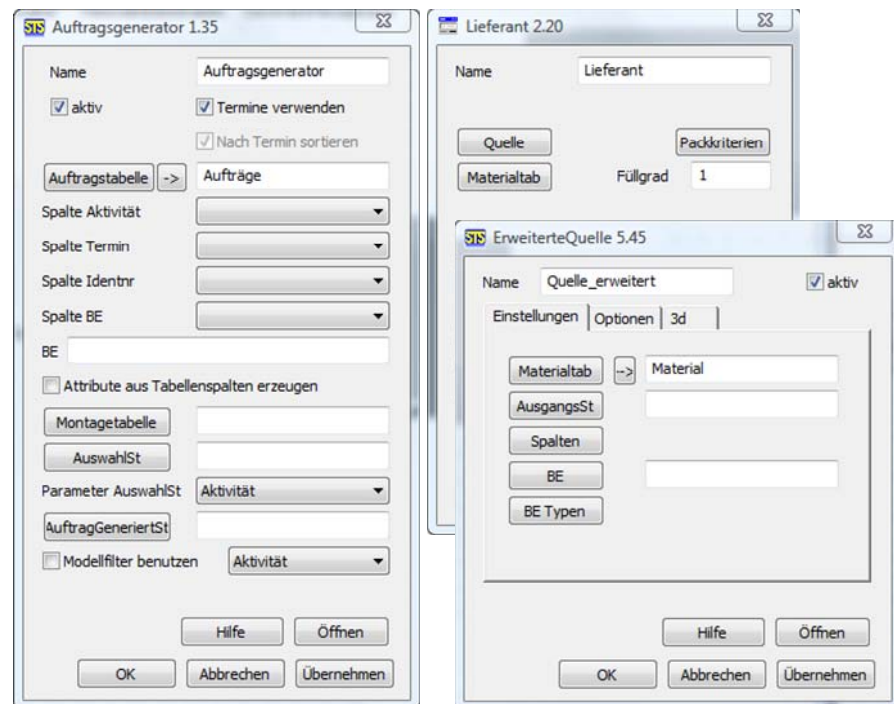
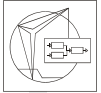


Bild 12 Konfiguration des Auftragsgenerators und der Lieferanten

Im nächsten Schritt werden das Personal über die Ressourcenverwaltung eingegeben und der Baukran, das Lager und der Baubereich parametrisiert. Die Angabe des verfügbaren Personals erfolgt durch die Definition von Qualifikationen sowie eine entsprechende Anzahl der Mitarbeiter. In diesem Beispiel werden die Qualifikationen „Kranfahrer“ und „Montage“ mit einer entsprechenden Anzahl von Personen (siehe Bild 13) spezifiziert.

Die geometrischen Abmessung des Baukrans, Lagers und Baubereichs sowie die produktionstechnischen Eigenschaften des Baukrans können mit Hilfe entsprechender Dialoge angegeben werden. Lager und Baubereich besitzen eine Grundfläche von 15 m x 15 m bzw. von 25,8 m x 13,8 m. Für den Baukran wird beispielsweise eine maximale Hakenhöhe von 25 m, eine maximale Tragfähigkeit von 8.000 kg, eine maximale Ausladung von 36 m sowie ein Fahrer mit der Qualifikation „Kranfahrer“ festgelegt (siehe Bild 14).

Abschließend werden noch die verschiedenen Eingangsdaten mit dem ConstraintManagement verknüpft. Hierzu gehören die Aufträge, Montagedetails, Arbeitsschritte, lokalen und globalen Constraints. Auf Grundlage dieser Informationen werden einzelne Montage- und Transportschritte beim Simulationsstart definiert. Diese werden im Rahmen der Simulation geprüft und ausgeführt.

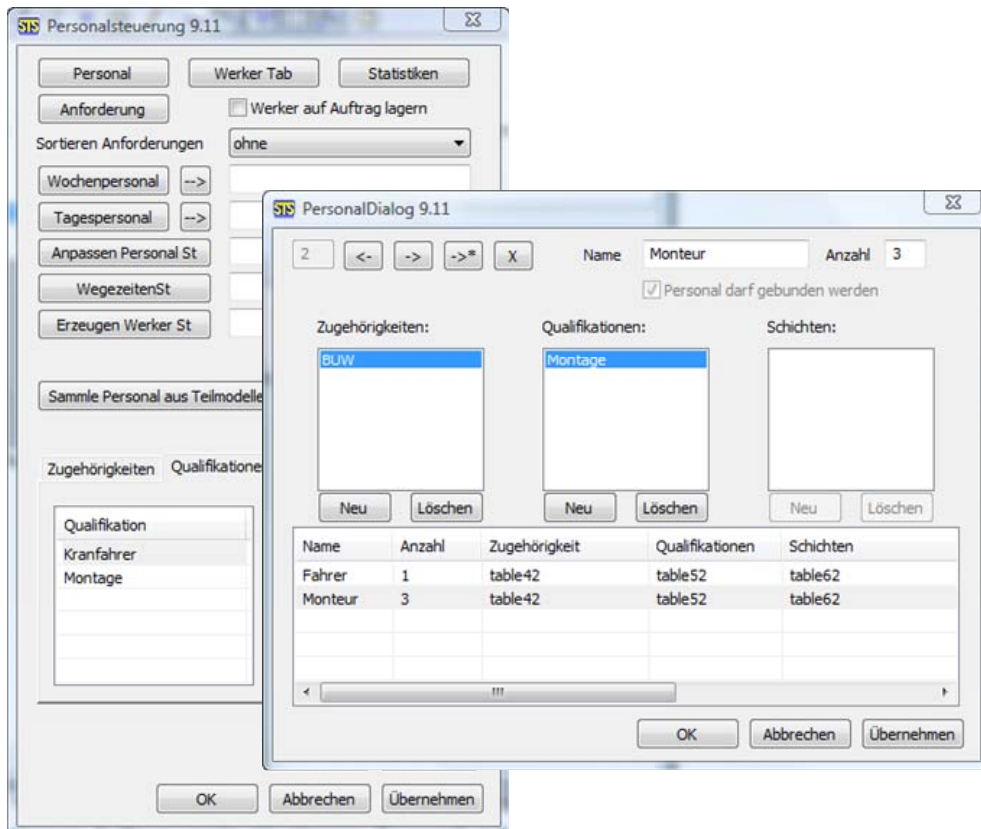


Bild 13 Definition von Qualifikation und Personal

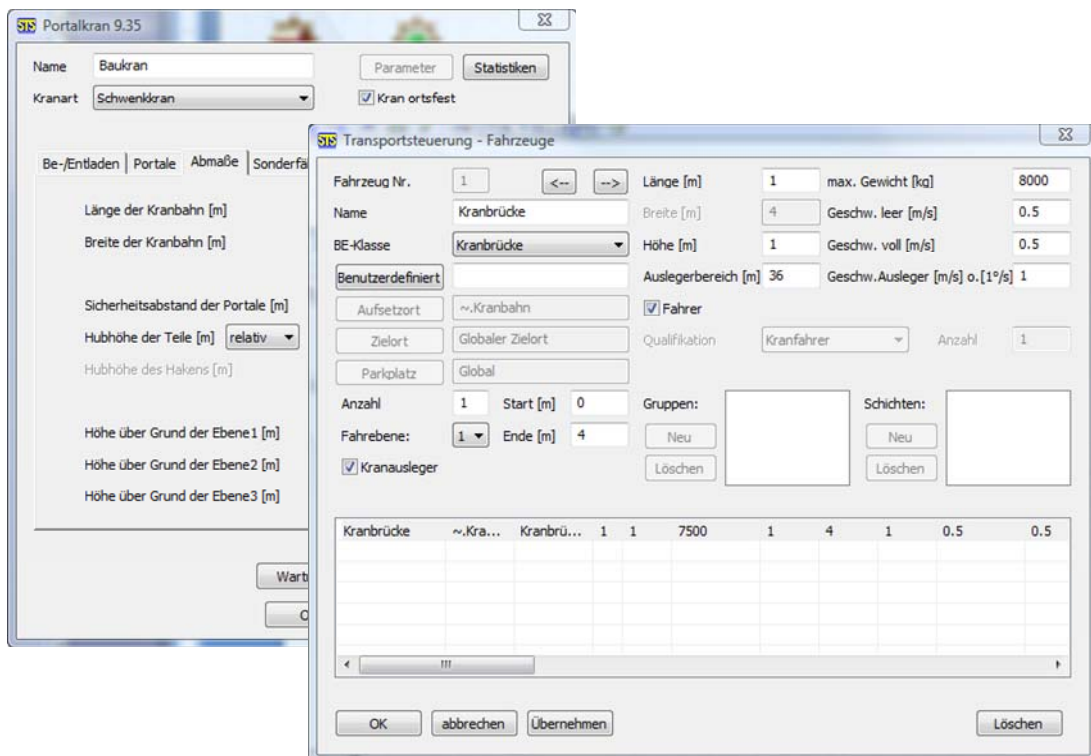
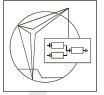


Bild 14 Parametrisierung des Baukrans



## 6.4 Ablauf einer Simulationsstudie

Nachdem alle Komponenten und Eingangsdaten verknüpft bzw. parametrisiert wurden, kann ein Simulationslauf mit Hilfe des Ereignisverwalters gestartet werden. Während der Initialisierung werden folgende Aktionen ausgeführt:

- Auslesen der Auftragsdaten durch den Auftragsgenerator. Für jeden Auftrag wird ein Bauwerk erstellt. Dieses Bauwerk wird auf dem spezifizierten Baubereich positioniert. Hierdurch wird gleichzeitig die Prüfung der Arbeitsschritte durch das ConstraintManagement angestoßen.
- Das ConstraintManagement generiert auf Basis der definierten Strategien für die vorhandenen Bauwerke und Bauteile entsprechende einzelne Arbeitsschritte.
- Der Lieferant generiert die einzelnen Materialelemente und liefert diese zum angegebenen Lager. In diesem Beispiel sind keine Transportwege bzw. Transportmittel definiert, daher werden die Materialien einfach im angegebenen Lager abgelegt.

Durch diese Initialisierung wird die Montage gestartet. Alle Arbeitsschritte, deren Constraints vollständig erfüllt sind, werden jetzt gestartet. Befindet sich das geforderte Material noch nicht am Einbauort wird ein entsprechender Transportvorgang mit dem spezifizierten Transportmittel gestartet. Erst wenn der Transport beendet ist, wird die Bearbeitung des anfordernden Schrittes begonnen. Nach Beendigung eines Schrittes wird wieder geprüft, welche nächsten Schritte gestartet werden können (siehe Abschnitt 3). Nach der Initialisierung des Simulationslaufs befinden sich alle definierten Materialelemente im angegebenen Außenlager. Die zu erstellenden Bauwerke sind auf dem Baubereich der Fertigteilhalle zur besseren Übersicht dargestellt (siehe Bild 15).

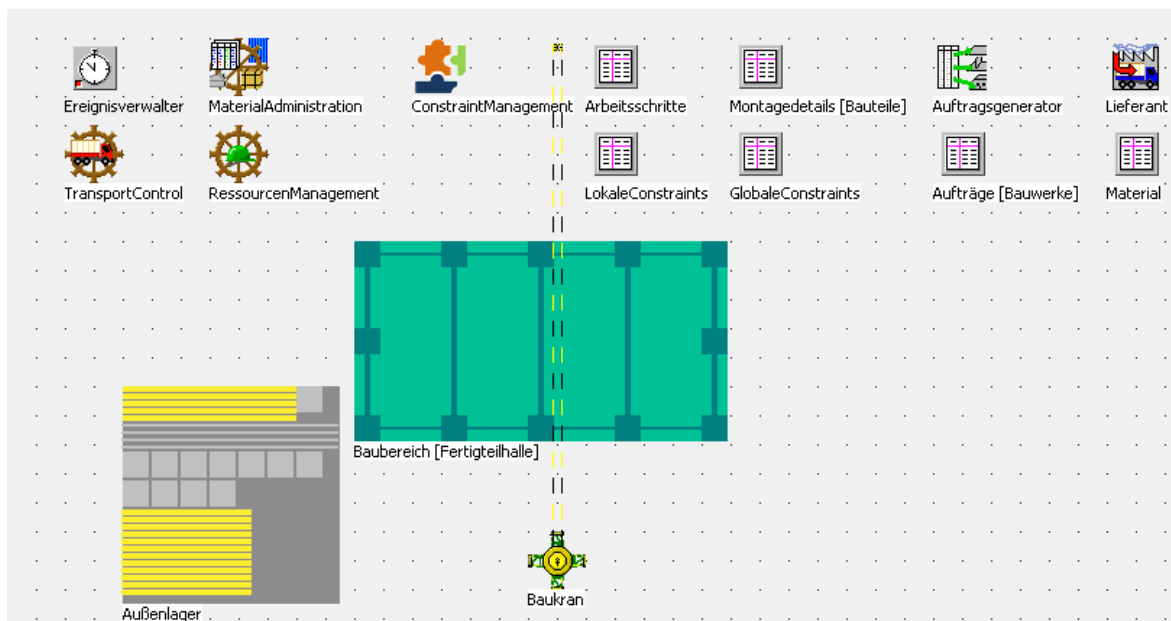


Bild 15 Simulationszustand nach der Initialisierung

Die Simulation startet mit dem Transport der Köcherfundamente zu den angegebenen Montagepositionen. Im Rahmen dieses Beispiels wurde keine Reihenfolge bzgl. der Köcherfundamente definiert. Somit startet die Montage der Köcherfundamente zufällig (siehe Bild 16).

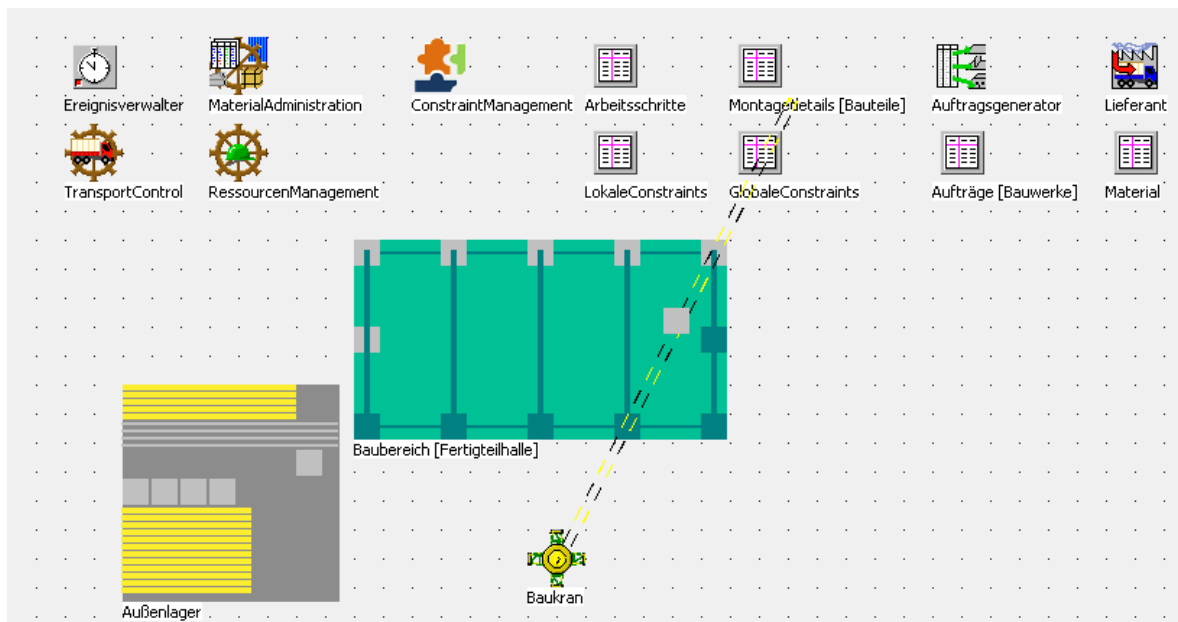


Bild 16 Simulationszustand während der Montage der Köcherfundamente

Anschließend werden die Frostriegel, Stützen sowie die Binder transportiert und montiert. Die technologische Reihenfolge ergibt sich aus den definierten lokalen und globalen Constraints (siehe Bild 17). Durch die Angabe zusätzlicher globaler Constraints können auch gewünschte Fertigungsrichtungen fest definiert werden. Im Rahmen dieses Beispiels wurden keine Reihenfolgen zwischen der Montage gleicher Bauteiltypen definiert.

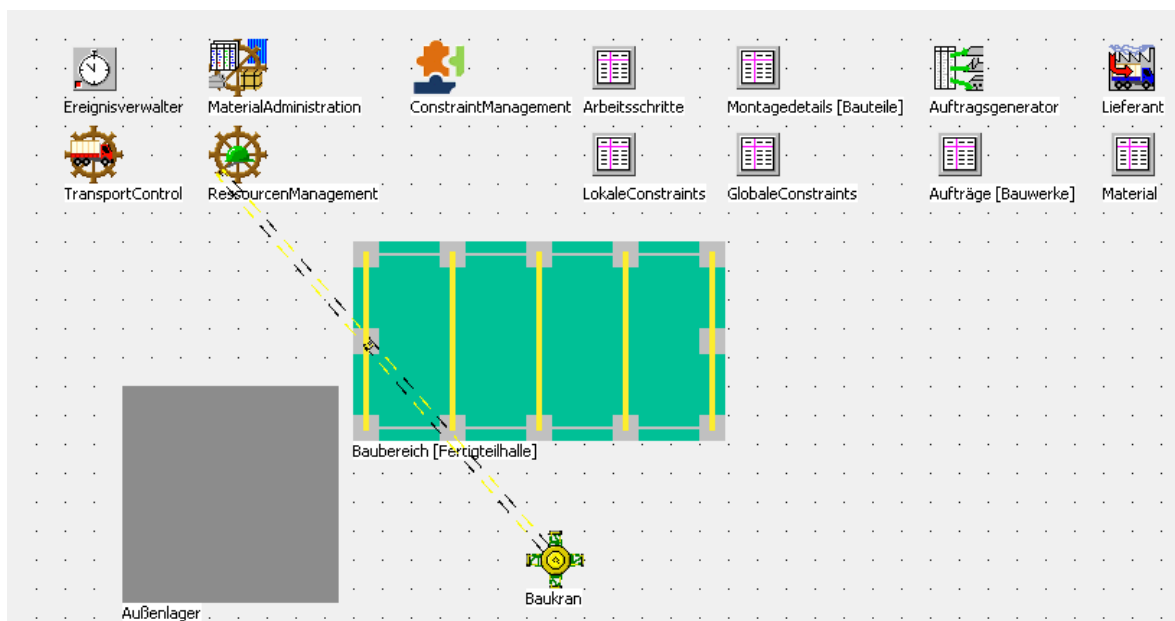


Bild 17 Simulationszustand nach der Bearbeitung aller Montageschritte

## 6.5 Auswertung einer Simulation

Nach der Durchführung eines Simulationslaufs können verschiedene während der Simulation aufgezeichnete Daten ausgewertet und aufbereitet werden. Hierzu gehören beispielsweise die Bearbeitungszeiten (Startzeitpunkt und Endzeitpunkt) der Montageschritte, die zugeordneten Ressourcen bzw. Mitarbeiter, Transportanfragen sowie die benötigte Lagerplatz. Für verschiedene Simulationsergebnisse sind im verwendeten Simulationsbausteinkasten schon entsprechende Auswertungsdiagramme vorgesehen. In Bild 18 wird beispielweise der Auslastung eines Monteurs dargestellt.

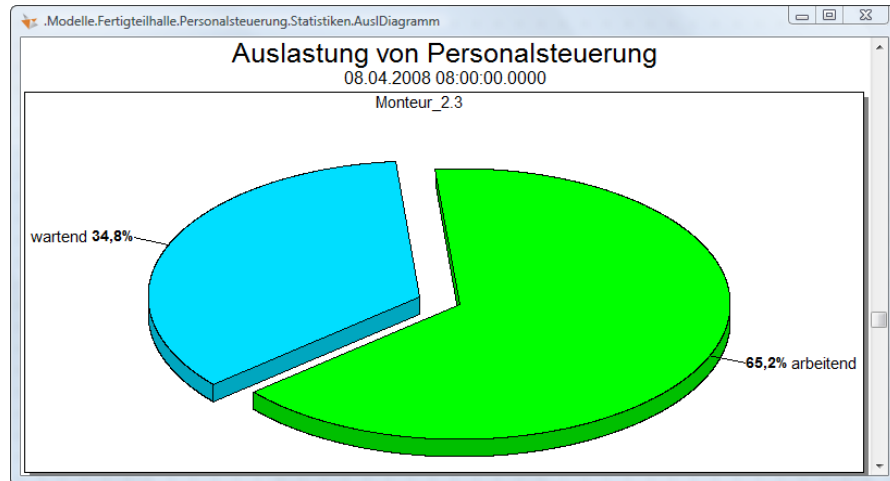
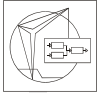


Bild 18 Auslastungsdiagramm eines Monteurs

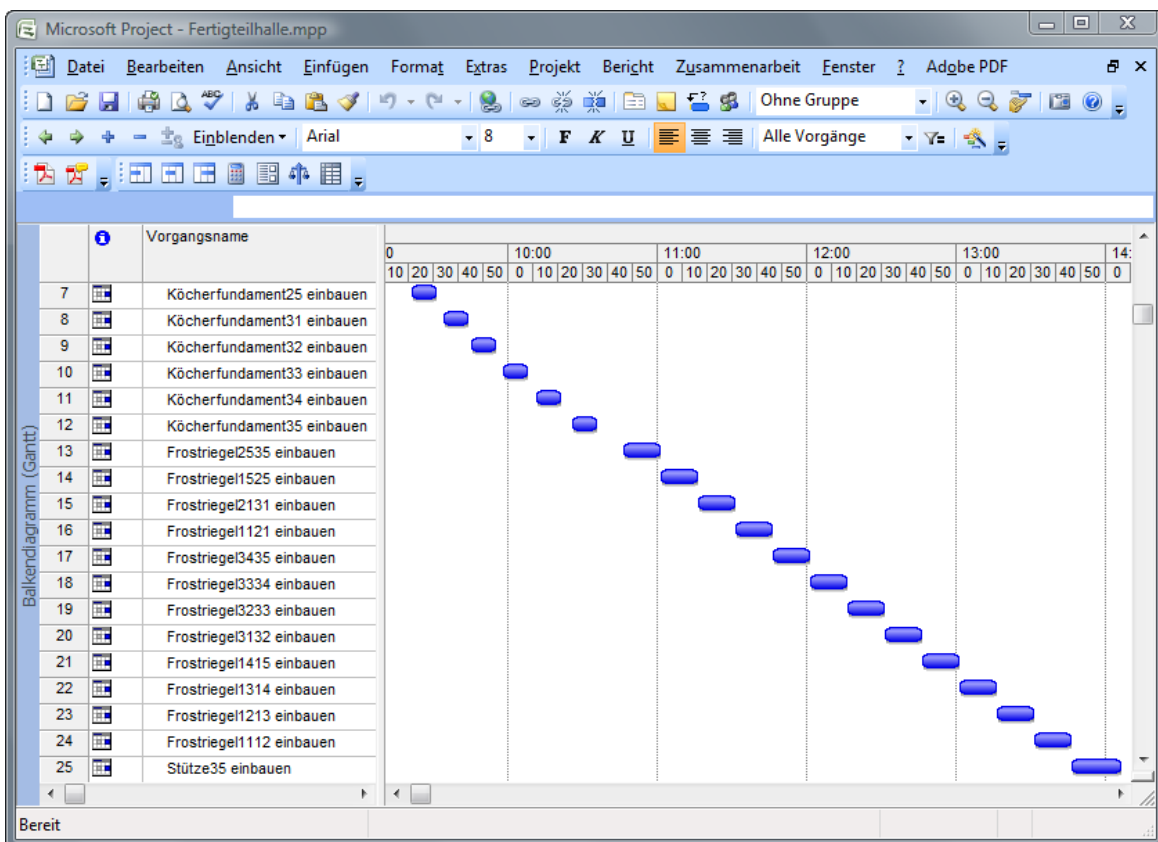


Bild 19 Gantt-Diagramm in Microsoft Project 2007



Die Zeiten für die Ausführung der einzelnen Bearbeitungsschritte können nach der Simulation in eine XML-Datei exportiert werden, um die entsprechenden Informationen, beispielsweise in Microsoft Project, als Gantt-Diagramm darzustellen. Ein entsprechendes Gantt-Diagramm ist in Bild 19 dargestellt.

Nach der Auswertung der Simulationsergebnisse können sinnvolle Anpassungen bzgl. Reihenfolgen oder Personalverfügbarkeit vorgenommen werden, um eine verbesserte Lösung mit Hilfe weiterer Simulationsläufe zu finden. Auf Optimierungsaspekte wird im Rahmen dieses Beitrags nicht näher eingegangen. Der vorgestellte Simulationsansatz bzw. die entwickelten Simulationskomponenten werden im Rahmen weiterer Anwendungen sowohl experimentell als auch praktisch eingesetzt. Hierzu gehören beispielsweise Simulationen im Bereich der Stahlmodulmontage im Schiffbau, der Fassadenmontage und des Trockenbaus im Hochbau.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationsziele konzentrieren sich zunächst auf die Prüfung vorhandener Planungsdaten und Liefertermine sowie der Erstellung von Prognosen auf Basis von aktuellen Ist-Daten. Zudem rücken verstärkt Untersuchungen von verschiedenen Szenarien bzgl. Sensitivität, Optimierung von Zeit, Kosten und Auslastung durch Parameterstudien (Ressourcen, Zeiten etc.) in den Fokus. Die Untersuchung neuartiger Bauverfahren mittels Simulation wird zudem eine verbesserte Diskussionsgrundlage bilden.

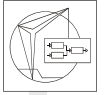
In der zukünftigen Arbeit soll das Constraint-Konzept um Strategien und räumliche Bedingungen erweitert werden. Zur vereinfachten Modellerstellung soll die interaktive Definition von Constraints mit Hilfe eines CAD-Systems (Arbeitsbereiche, globale Reihenfolgen etc.) ermöglicht werden. Zudem ist die Visualisierung von Konflikten anzustreben (Ressourcen, Termine, Arbeitsbereiche), um den Informationstransfer des Modells zu erhöhen.

Eine Bereicherung für das Modell ist die Erweiterung um die Möglichkeiten der lokalen Optimierung. Vorstellbar ist hierbei die Optimierung der nächstmöglichen Schritte durch Nutzung der Eigenschaft zur Relaxation der Soft Constraints. Der Grad der Soft-Constraint-Erfüllung kann hierbei als Bewertungsindikator zur Ermittlung der sinnvollen nächsten Schritte herangezogen werden. Anschließend erfolgt die Suche nach optimalen Reihenfolgen in einer bestimmten Nachbarschaft, z. B. mit Hilfe der Metaheuristiken Simulated Annealing, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure. Eine globale Optimierung ist in der Regel nicht möglich.

Im Bereich Logistik werden derzeit ebenfalls Untersuchungen von Logistikstrategien zur effektiven Anlieferung, Einlagerung und Umlagerung von Materialien durchgeführt. Die sinnvolle Festlegung und Optimierung von Lagerplätzen (Außenlager, Zwischenlager etc.) ist dabei eine entscheidende Untersuchungsgröße.

Die produktgestützte Modellgenerierung ist eine Vision der zukünftigen Arbeit, an deren Umsetzung bereits geforscht wird. Hierbei sollen auf der Basis von Produktdaten in verschiedenen Detailstufen Basis-Simulationsmodelle generiert werden. Das erfordert zunächst die Erweiterung der CAD-Modelle um entsprechende Informationen sowie die Kopplung von CAD-Modellen mit Material- und Leistungsbeschreibungen.

## 8 Literatur

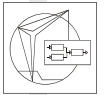


- [1] Girmscheid, G.:  
Bauproduktionstheorie – Strukturrahmen, Bauingenieur 2007, Vol. 82 Issue 09, pp.404–413
- [2] IBW – Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung:  
Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2005, <http://www.bmvbs.de>, 2006
- [3] Steinhauer, D.; Heinemann, M.:  
Simulation Based Transport and Storage Planning on a Shipyard, ASIM Dedicated Conf. for Simulation in Production and Logistics 2004, pp.113–122
- [4] König, M.; Beißert, U.; Bargstädt, H.-J.:  
Visual simulation – an appropriate approach to support execution planning in building engineering, Online Proceedings of the 7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, Pennsylvania State University, USA, 2007
- [5] <http://www.simofit.com>  
(Forschungskooperation Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering)
- [6] König, M.; Beißert, U.; Steinhauer, D.; Bargstädt, H.-J.:  
Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering, 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation (CD-ROM), Ljubljana, Slovenia, 2007
- [7] <http://www.simcomar.com>  
(Forschungskooperation Simulation Cooperation in the Maritime Industries)
- [8] Kumar, V.:  
Algorithms for constraint satisfaction problems: A survey, AI Magazine, 1992, Vol. 13 Issue1, pp. 32–43
- [9] Rossi, F.; van Beek, P.; Walsh, T.:  
Handbook of Constraint Programming, 1st Ed., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2006
- [10] van Hentenryck, P., Saraswat, V., et al.:  
Strategic Directions in Constraint Programming, ACM Computing in constraint programming, Vol. 28 Issue 4, pp. 701–726
- [11] Freuder, E.C.; Wallace, R.:  
Partial constraint satisfaction, Artificial Intelligence, 1992, Vol. 58, pp. 21–70
- [12] Sauer, J.:  
A Multi-Site Scheduling System, Proc. Artificial Intelligence and Manufacturing – Research Planning Workshop – State of the Art and State of the Practice, Albuquerque, AAAI-Press, 1998, pp. 161–168
- [13] Fargier, H.; Lang, J.; Martin-Clouaire, R.; Schiex, T.:  
A constraint satisfaction framework for decision under uncertainty, Proceedings of the 11th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 1995, Montreal, Canada
- [14] Dubois, D.; Fargier, H.; Fortemps, P.:  
Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge. European Journal of Operational Research, 2003, Vol. 147 Issue 2, pp. 231–252
- [15] Sriprasert; E.; Dawood, N.:  
Genetic algorithms for multi-constraint scheduling: An application for the construction industry, International Council for Research and Innovation in Building and Construction – CIB w78 conference 2003, <http://itc.scix.net> (last access 30.10.2007)
- [16] Sriprasert, E.; Dawood, N.:  
Requirements identification for 4D constraint-based construction planning and control systems. International Council for Research and Innovation in Building and Construction – CIB w78 conference 2002, <http://itc.scix.net> (last access 30.10.2007)



- [17] Akinci, B.; Fischer, B.; Levitt, R.; Carlson, R.:  
Formalization and automation of time-space conflicts analysis, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, Vol. 16 Issue 2, pp. 124–136
- [18] Mallasi, Z.:  
Identification and visualization of construction activities' workspace conflicts utilizing 4D CAD/VR tools, *Proceedings of 1st ASCAAD International Conference e-Design in Architecture*, 2004, pp. 235–253
- [19] Beißert, U.; König, M.; Bargstädt, H.-J.:  
Execution strategy investigation using soft constraint-based simulation. Accepted Paper on the IABSE Helsinki June 2008.
- [20] <http://www.ugsplm.de>  
(Firma Siemens PLM GmbH)
- [21] Smith, S.F.; Becker, M.A.:  
An ontology for constructing scheduling systems, *Working Notes from 1997 AAAI Spring Symposium on Ontological Engineering*, 1997, Stanford, CA, AAAI Press





## **Erfassung von Bauprozessdaten zur zeitnahen Steuerung von Bauproduktionsprozessen mit RFID**

Die automatisierte Erfassung von Produktionsprozessen ist im Gegensatz zur stationären Industrie in der Bauwirtschaft bisher nur eingeschränkt möglich. Es stehen bereits jetzt einzelne Methoden zur Verfügung, Bauprozesse digital zu erfassen und zu dokumentieren, wie z. B. die automatische Maschinendatenerfassung (vorwiegend im Tiefbau), die Baufortschrittsdokumentation per Webcam, die mobile Zeiterfassung mit Funktelefonen sowie das elektronische Aufmaß per Laserscanning. Allerdings ist die Verarbeitung dieser Informationen zu prozessbezogenen Echtzeitdaten angesichts der besonderen Produktionssituation, der Variantenvielfalt und des geringen Automatisierungsgrades in der Bauwirtschaft schwierig. Als Folge bleibt eine statische Form der Prozesssteuerung für dynamische Bauproduktionsprozesse.

### **Bauprozesssteuerung**

Die Fertigung eines Bauobjektes findet im Regelfall im Freien auf dem Grundstück des Kunden statt. D. h., nicht nur die gesamten Produktionsmittel, alle Stoffe und Materialien sowie die Arbeitsplätze für die Baustellenbelegschaft, sondern eine vollständige, temporäre Produktionsinfrastruktur muss koordiniert entstehen, um zum richtigen Zeitpunkt vor Ort eingerichtet und betriebsfertig zu sein. Diese Aufgabe dadurch wird erschwert, dass Bauwerke traditionell Prototypen sind und das Personal für jedes Projekt aus einer Vielzahl von verschiedenen Unternehmen in Form der Baustellenbelegschaft neu zusammengestellt wird. Jede Baustelle stellt mit den Faktoren Personal, Produktionseinrichtungen, Material und Informationen ein temporäres, komplexes und dynamisches System dar, das ständigen externen und internen Einflüssen und Aktionen unterliegt. Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung wird die Erstellung der Bauleistung in vertragsgemäßer Qualität und Quantität vorausgeplant, indem Bauverfahren, Ressourcen und Termine festgelegt werden. Im Verlauf der Bauausführung werden der Baufortschritt und die Baukosten regelmäßig erfasst und mit der Fertigungsplanung verglichen. Bei Abweichungen der Ist-Leistung vom geplanten Soll werden Handlungsspielräume abgewägt und gegebenenfalls die Ausführungsplanung entsprechend angepasst (siehe Bild 1). Um Bauvorhaben wirtschaftlich erfolgreich, mangel- und unfallfrei abzuschließen, muss zwangsläufig der Steuerung und Koordination der Herstellungsprozesse eines Bauprojektes eine besondere Bedeutung beigemessen werden.

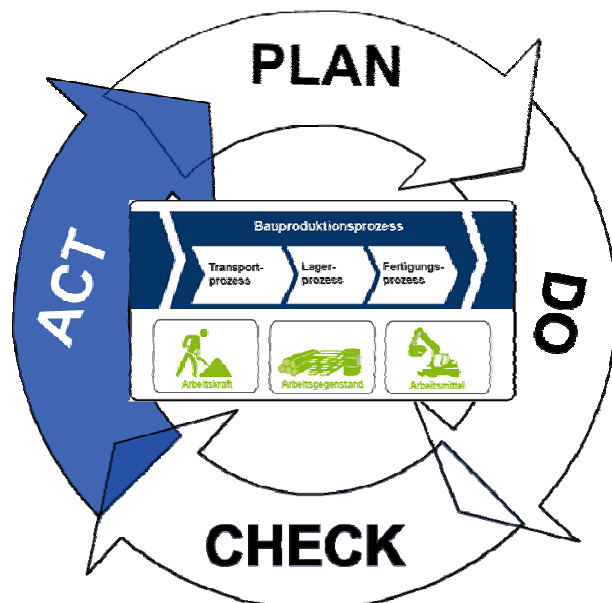


Bild 1 Regelkreis Bauprozesssteuerung



Ein wesentliches Problem der Steuerung der Bauproduktionsprozesse liegt in der Informationsbeschaffung. Informationen bilden die Grundlage für rationale Unternehmensentscheidungen und werden in allen Unternehmensbereichen als Bezugsgröße benötigt – auch um das Erreichen der Unternehmensziele zu verifizieren und eine überarbeitete Zielsetzung fortzuschreiben. Durch die Analyse und Auswertung von Prozessdaten können beispielsweise Fertigungs-, Steuerungs- und Finanzinformationen generiert werden. Die Erfassung von Prozessdaten auf Baustellen ist überaus aufwändig. Während in der stationären Industrie überschaubare Arbeitssysteme und feste Arbeitsbereiche mit festen Mitarbeitern die Regel sind, erschweren die zuvor genannten Besonderheiten einer Baustelle eine Abbildung, Messung und Steuerung von Produktionsprozessen in erheblichem Umfang. Den dynamischen Abläufen einer Baustelle steht im Grunde ein statisches Informationssystem gegenüber, das in der Baupraxis häufig auf periodischen Leistungsmeldungen zu bestimmten Stichtagen beruht. Rückblickend werden Bauleistungsstände anhand von Aufmaßen entsprechend den Positionen des Leistungsverzeichnisses (LV) gemeldet und der Baufortschritt subjektiv mit Hilfe von Terminplänen, Lieferscheinen, Stundenzetteln, Besprechungsprotokollen sowie Kosten- und Leistungsansätzen aus der Kalkulation beurteilt und geprüft. Unterstützt wird die Leistungsstandsermittlung durch verschiedene Datenverarbeitungssysteme, die wiederum auf eine manuell eingegebene Datengrundlage angewiesen sind. Diese Formen der Leistungserfassung mögen zwar teilweise ein ausreichendes Bild über den Stand der Arbeiten eines Bauprojektes zulassen, aber direkte Rückschlüsse zu einzelnen Herstellungsprozessen sind auf der Grundlage des Berichtswesens nur beschränkt möglich.

Die Technik der Radio Frequency Identification bietet an dieser Stelle eine Möglichkeit zur automatischen Bauprozessdatenerfassung und besitzt somit das Potenzial, den Informationsfluss im Bauwesen zu verbessern. Das Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal untersucht seit mehreren Jahren die Grundlagen für neue Konzepte und Modelle der dynamischen Baustellensteuerung sowie der Baustellenorganisation und inwieweit die RFID-Technik als Werkzeug dafür geeignet ist.

## Radio Frequency Identification (RFID)

Radio Frequency Identification ist eine Technik, die zur Identifizierung von Objekten jeglicher Art eingesetzt werden kann. Verschiedene Objekte werden dabei mit Transpondern (so genannten Tags oder Smart-Labels) ausgestattet, die in der Lage sind, begrenzt Informationen digital zu speichern. Mit Hilfe eines Lesegerätes können die gespeicherten Daten berührungslos ausgelesen, verwertet und aktualisiert werden.

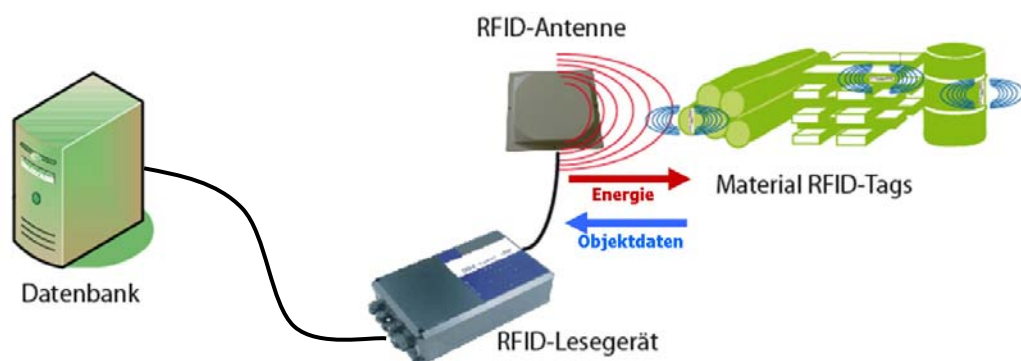
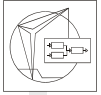


Bild 2 Elemente eines RFID-Systems

Das Grundprinzip von RFID basiert auf der berührungs- und sichtkontaktlosen Datenerfassung und -übertragung mittels elektromagnetischer Wellen (UHF/MW) bzw. elektromagnetischer Kopplung (LF/HF).



Die elektromagnetische Kopplung wird bei Systemen verwendet, die in einem Frequenzbereich von 125 kHz (Low-Frequency, LF) bis 13,56 MHz (High-Frequency, HF) arbeiten. Im Nahfeld der Sende- und Empfangsantenne des Readers nutzen die passiven Transponder das elektromagnetische Feld des Readers als Energiequelle nach dem Prinzip der Induktion. Die Lesereichweiten dieser Systeme liegen zwischen einem Zentimeter und einem Meter. Kennzeichnend sind Transponder mit einer Spule als Antenne.

Die Lesereichweite von RFID-Systemen auf der Basis zurückgestrahlter elektromagnetischer Wellen betragen mit passiven Transpondern mehrere Meter. Der Frequenzbereich reicht bei diesem Prinzip von 868 MHz (Ultra-High-Frequency, UHF) bis in den Gigahertz-Bereich<sup>1</sup> (Microwave, MW). Kennzeichnend für diese Systeme sind Transponder mit einer Antenne, die einen Dipol bildet und die Möglichkeit bietet, mehrere Objekte gleichzeitig identifizieren zu können (Pulkerfassung).

Im Wesentlichen besteht ein RFID-System aus drei Elementen: den Transpondern, einer mobilen oder stationären Lese- und Schreibeinheit mit Sende- und Empfangsantennen sowie einem Datenverarbeitungssystem, das die Ereignisdaten den Anwendern zur Verfügung stellt.

## Technische Rahmenbedingungen zum Einsatz von RFID

Für die Bauprozessdatenerfassung ist der Fokus auf RFID-Systeme im UHF-Bereich gelegt worden. Sicherlich existieren in der Bauwirtschaft einzelne Anwendungen, für die Systeme in anderen Frequenzbereichen besser geeignet sind. Für eine automatisierte Bauprozessdatenerfassung sind Reichweiten von mehr als drei Metern bei der gesetzlich zugelassenen Sendeleistung von maximal 2 Watt<sub>(eirp)</sub><sup>2</sup> und die Verfügbarkeit von Hardware, die in großen Teilen den Standards der Organisation GS1/EPCglobal<sup>3</sup> entspricht, ausschlaggebend gewesen, da langfristig von einem vernetzten Informationsaustausch ausgegangen wird, der ohne weitergehende Normierung nicht umsetzbar ist.

Die Leseleistung eines RFID-Systems, das im UHF-Bereich arbeitet, ist wesentlich von den Materialeigenschaften der sich im Strahlungsfeld befindlichen Objekte und der Auswahl des entsprechenden Transponders abhängig. Die Ursache für diese Abhängigkeit liegt zum einen darin begründet, dass nicht leitfähige Materialien die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit ihrer Dichte und ihres Reflexionsvermögens dämpfen. Zusatzstoffe, wie z. B. Wasser in jungem Beton, verstärken dabei die Dämpfung, sodass möglicherweise ein Transponder im Betonfertigteile nicht direkt erkannt wird. Zum anderen werden elektromagnetische Wellen von leitenden Materialien, insbesondere Metallen, vollkommen reflektiert, wodurch Objekte hinter Metall überhaupt nicht erkannt werden können (physikalische Grenzen).

Die Auswirkung der Materialeigenschaften der zu identifizierenden Objekte auf das elektromagnetische Strahlungsfeld führt dazu, dass die besten Leseergebnisse nur erreicht werden, wenn die Objekte mit dem Transponder und dem Leseereignis abgestimmt sind. Für den Einsatz von RFID können in Abhängigkeit der Erfassungsziele aufwändige, organisatorische Maßnahmen notwendig sein, um technische Grenzen der RFID-Technik zu kompensieren.

---

<sup>1</sup> Im MW-Bereich werden aktive Transponder eingesetzt, die im Gegensatz zu passiven Transpondern über eine eigene Energieversorgung in Form einer eingebauten Batterie verfügen. Aufgrund der hohen Anschaffungs- und späteren Betriebskosten sind diese nicht weitergehend untersucht worden.

<sup>2</sup> In Freifeldversuchen sind mit der max. zugelassenen Sendeleistung auch höhere Reichweiten erzielt worden.

<sup>3</sup> GS1 ist das Dienstleistungs- und Kompetenzzentrum für unternehmensübergreifende Geschäftsabläufe in der deutschen Konsumgüterwirtschaft und ihren angrenzenden Wirtschaftsbereichen, die sich aktiv bei der Normierung von RFID engagiert.



## Bauprozessdatenerfassung mit RFID

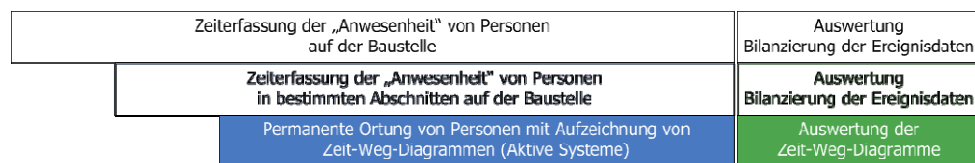
Bei der Objektidentifikation mit RFID werden im Grunde Ereignisdaten automatisch erzeugt und gespeichert. Das einfachste Ereignis besteht dabei aus der Meldung, dass das System einen Transponder im Strahlungsfeld erkennt. Damit dieses Leseereignis für eine Auswertung einen Sinn ergibt, muss der Transponder das digitale Identifikationsmerkmal eines Objektes sein, wobei das Objekt bezogen auf das Bauwesen beispielsweise ein Bauelement, eine Baumaschine oder eine bestimmte Person sein könnte. Außerdem sollte mit dem Leseereignis der Zeitpunkt und der Ort der Erfassung dokumentiert werden (bei stationären RFID-Systemen automatisch, bei mobilen Systemen als manuelles Eingabefeld). Unter Berücksichtigung des Verwendungszweckes der Ereignisdaten kann auch die Möglichkeit, dem Leseereignis zusätzliche Informationen manuell zuzuordnen zu können, von Nutzen sein. Unter diesen Voraussetzungen wird bei jedem Leseereignis ein Datensatz mit den folgenden Informationen dokumentiert (siehe Bild 3):



Bild 3 Methode der Bauprozessdatenerfassung mit RFID

Die Genauigkeit der Bauprozessdaten ist nicht zuletzt von der Zielsetzung abhängig, mit der die Prozessdatenerfassung betrieben werden soll. Die Ansätze reichen dabei von der Erfassung globaler Daten, wie z. B. die reine Anwesenheit auf der Baustelle, bis zu sehr detaillierten Prozessdaten, die auf der Grundlage einer permanenten Ortung von signifikanten Einbauteilen oder bestimmten Personen gewonnen werden (siehe Bild 4).

### Personenerfassung



### Materialerfassung

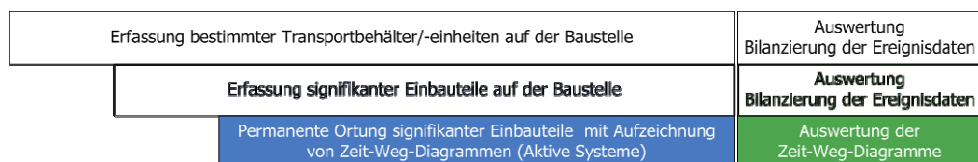
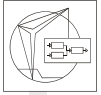


Bild 4 Stufen der Bauprozessdatenerfassung



Ein einfaches Anwendungsszenario für eine Bauprozessdatenerfassung ist beispielsweise die Erfassung der Arbeitsstunden für die Ausführung von Trockenbauarbeiten in einem Regelgeschoss eines Hochhauses.

Voraussetzung für die Datenerfassung ist, dass alle Mitarbeiter, die Trockenbauarbeiten ausführen, mit einem lesbaren RFID-Transponder ausgestattet sind, alle Zugänge der Hochhausetage mit stationären RFID-Portalen überwacht und alle Materialien auf der Etage gelagert werden. Bei den stationären RFID-Portalen muss des Weiteren eine Abschirmung oder eine Leistungsbegrenzung erfolgen, damit keine „ungewollten“ Leseereignisse stattfinden.

Wenn der Trockenbauer die Etage betritt oder verlässt, wird vom System automatisch ein Datensatz angelegt (siehe Tabelle 1). Anschließend werden die Leseereignisse vom Datenverarbeitungssystem ausgewertet, indem der erste Eintrag am Tag von jedem Mitarbeiter als Betreten und der folgende Eintrag als Verlassen der Etage gewertet wird. Aus der Differenz der Zeiten lassen sich zunächst die Anwesenheitszeiten auf der Etage errechnen. Für die Berechnung der Arbeitsstunden sind im System noch die Pausenzeiten zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit ist, die Pausen als einen festen Prozentsatz von den Anwesenheitszeiten pauschal abzuziehen. Alternativ könnten die Pausen auch als feste Vorgaben im System integriert sein, so dass z. B. die Zeit zwischen 12:00 Uhr und 12:30 Uhr generell als Pause abgezogen wird.

Die Qualität der mit RFID gewonnen Bauprozessdaten wird sich erst nach Abschluss der Praxistests beurteilen lassen.

Tabelle 1: Exemplarische Ereignisdaten

Eintrag	Mitarbeiter	Datum	Uhrzeit	Zusatzinformationen
1	123	14.04.2008	6:50:13	
2	223	14.04.2008	6:50:14	
3	123	14.04.2008	10:25:54	
4	123	14.04.2008	10:35:01	
5	223	14.04.2008	11:15:35	
6	332	14.04.2008	12:45:12	
7	332	14.04.2008	12:47:55	
8	223	14.04.2008	13:00:24	
9	123	14.04.2008	16:13:12	
10	223	14.04.2008	16:13:24	

## Fazit

Das Anwendungsszenario verdeutlicht, dass der Einsatz der RFID-Technik als Instrument der Prozessdatenerfassung komplizierter ist, als es zu Anfang schien. Neben den organisatorischen Maßnahmen zur Durchführung der Prozessdatenerfassung sind vor allem auch die technischen Rahmenbedingungen der RFID-Systeme zu berücksichtigen. Je nach Anwendung kann so beispielsweise eine als Vorteil gewertete, hohe Lesereichweite schnell zu ungewollten Leseereignissen führen, die letztendlich die Qualität der gewonnenen Prozessdaten mindert oder sogar unbrauchbar macht.



Die Erfassung von Bauprozessdaten mit neuen Technologien, wie RFID, Laserscanning, Massenermittlung aus Bildern und mobile Zeiterfassung, führt langfristig zu einer vernetzten Digitalisierung der realen Welt. Die Zielsetzung sollte dabei sein, die Werkzeuge zur Bauprozessdatenerfassung für Anwender wie Bau- und Projektleiter soweit zu vereinfachen, dass sie das Berichtswesen unterstützen und mehr Zeit für die eigentlichen Kernaufgaben der Bauwerkserstellung zur Verfügung steht.

### **Literatur:**

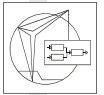
Binner, H. F. (2003): Prozessorientierte Arbeitsvorbereitung. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik (2004): Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Bonn, SecuMedia Verlags-GmbH.

Finkenzeller, K. (2002): RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag.

Helmus, M.; Weber, O. (2006): Baustellenkoordination mit RFID, Baumarkt + Bauwirtschaft, Gütersloh, Heft 8, Seite 29–31.

REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (1984): REFA in der Baupraxis. Teil 1 bis 4. Frankfurt am Main: ZTV-Verlag.



## **Bauwerksscans in Echtzeit**

---

Die rasante Entwicklung im Bereich der Lasertechnologie forciert auch die Leistungsfähigkeit der reflektorlosen Distanzmessung mit Laserlicht. Das Messverfahren ist dabei so schnell, dass in kurzer Zeit Räume dreidimensional hochauflösend abgetastet werden können. Der Vortrag zeigt Möglichkeiten, wie vielfältig terrestrische Laserscanner eingesetzt werden können. Dies wird anhand einiger Forschungsprojekte des Geodätischen Instituts belegt.

Der Einsatz des Sensors ist dabei stets an den Anforderungen der Ingenieurgeodäsie ausgerichtet. Neben der deterministischen Erfassung und Zustandsmodellierung werden die Ergebnisse durchgehend auch stochastisch bewertet.

Im Vortrag wird der technische Stand der Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings aufgezeigt. Daraus ergeben sich mögliche zukünftige Tendenzen.

Echtzeitsysteme stellen spezielle Ansprüche an die Erfassung und an die Modellierung. Diese werden in Beziehung zu aktuellen Fortschritten gesetzt. Herausforderungen für einen Einsatz in Echtzeit sind dabei robuste Verfahren, um Scans von mehreren Standpunkten effizient miteinander zu verknüpfen und in einem übergeordneten Raumsystem zu referenzieren. Die großen Datenmengen verlangen angepasste Verfahren, um relevante Informationen aus unstrukturierten Datenmengen zu extrahieren.

Trotz der höheren Anforderungen, die an Echtzeitsysteme gestellt werden, bietet eine zeitnahe Auswertung die Möglichkeit, dass der Aufnahmeprozess intern gesteuert werden kann. Die Erfassung kann damit so angepasst werden, wie es der aktuellen Nachfrage aus dem Bauprozess entspricht. Dies ist besonders dann wertvoll, wenn, wie beim terrestrischen Laserscanning, große Datenmengen automatisch erfasst werden. Werden zum Beispiel aus dem Bauprozess gezielt räumlich begrenzte Bereiche angefordert, kann dadurch die zu prozessierende Datenmenge erheblich reduziert werden. Wird ein Scannergebnis in Echtzeit validiert, lässt sich zudem feststellen, ob die Erfassung den Erfordernissen genügt oder ob weitere Scans durchgeführt werden müssen.

Die automatische Erfassung eines terrestrischen Laserscanners benötigt ein individuelles Vorgehen, damit die Ergebnisse optimal für Bauprozesse nutzbar sind. Dafür ist es notwendig, dass geodätische Informationen nahe an den Anforderungen des Bauprozesses produziert werden. So kann für beide Seiten eine Fortentwicklung der Prozessabläufe erreicht werden.



Harald Vennegeerts, Geodätisches Institut Hannover

## **BAUWERKSCANS IN ECHTZEIT**

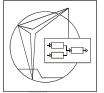
**Beitrag der Ingenieurgeodäsie zur Bauprozessforschung**

*„Die Ingenieurgeodäsie ist die Produktion von **geodätischen Informationen**, die eingesetzt werden*

- für die **Planung** technischer Projekte,
- für die **Absteckung** von Projektentwürfen,
- für die **Kontrolle** der Konstruktionen und
- für das **Monitoring** von Deformationen.“

(Fritz K. Brunner, in: Journal of Applied Geodesy, 1/2007)





### Planung des Projekt

- **Dokumentation** der Umgebung
- **Integration** in Baubestand

### Absteckung des Entwurfes

- **Örtliche Übertragung** von Positionen und Relationen
- **Steuerung** von Abläufen

### Kontrolle der Konstruktion

- **Überprüfung** von Entwurf und Örtlichkeit
- **ergänzende** Übertragung

### Monitoring der Deformation

- **Überwachung** von Bewegungen
- **Beschreibung** von Verhalten und Struktur

3

### Räumlich

- hohe Auflösung
- absolute und relative Referenzierung
- Import/Export zu bestehenden Datenbanken

### Zeitlich

- schnelle Erfassung
- schnelle Verarbeitung
- Aktualität

### Qualitativ

- stochastische Bewertung
- zuverlässige Verfügbarkeit

4



## Terrestrisches Laserscanning

- polares Verfahren
- Messelemente  
Winkel, Strecken  $\alpha, \phi, d \Rightarrow$  3D - Koordinaten
- Aktive Distanzmessung (reflektorlose Lasermessung)
- rasterförmiger Abgriff der Winkелеlemente (entfernungsabhängige Auflösung)
- Identifikation (virtuell) im Modell

5

## Verfahren der Distanzmessung

**Laufzeit**

**Phasenvergleich**

z.B.



Trimble GX 3D

z.B.



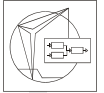
Z + F Imager 5006

Unterscheidung in

- Schnelligkeit
- Reichweite
- Sichtfeld

+ bildgebende Sensoren

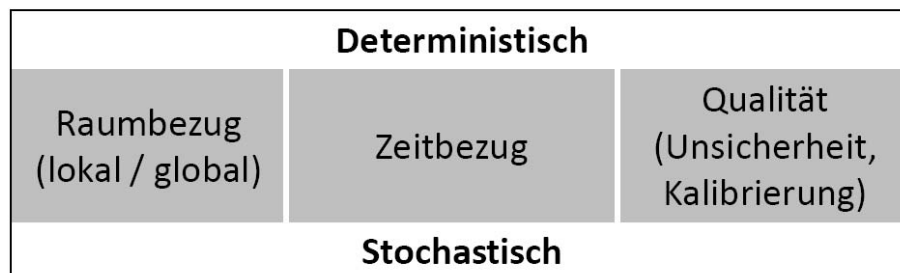
6



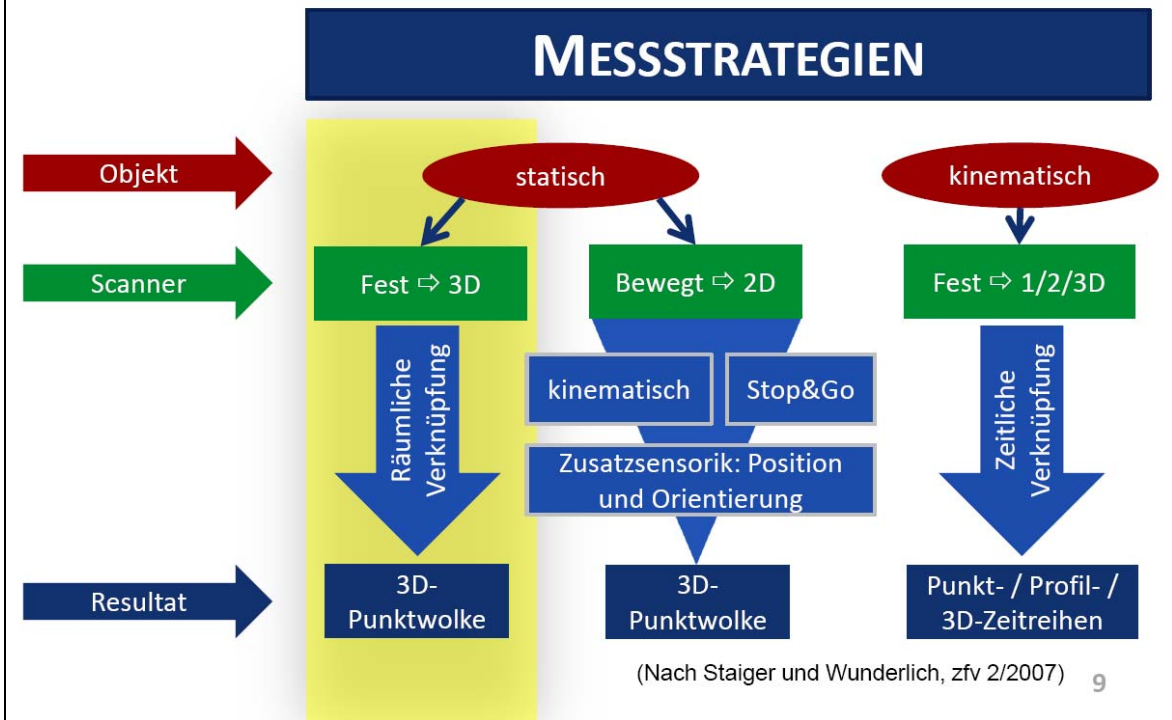
Distanz- messung	Instrument	Reichweite	Messrate	Genauigkeit*)	Gewicht
Laufzeit	Trimble GX 3D	≤ 350 m	≤ 5.000 pts/s	2,5 mm @ 100 m	13 kg
	Riegl LMS-Z420i	≤ 1.000 m	≤ 11.000 pts/s	10 mm @ 50 m	16 kg
komb.	Callidus CPW8000	80 m	≤ 50.000 pts/s	2 mm @ 30 m	k.A.
Phasenvergleich	Faro LS 880	≤ 76 m	≤120.000 pts/s	3 mm @ 25 m	14,5 kg
	Leica HDS 4500	≤ 53,5 m	≤500.000 pts/s	3 – 9 mm @ 25 m	16 kg
	Z+F Imager 5006	79 m	≤500.000 pts/s	1 – 3 mm @ 25 m	14 kg

\*) uneinheitliche Definition

7



8

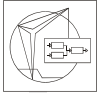


Scannen und Registrieren / Referenzieren der Punktwolken

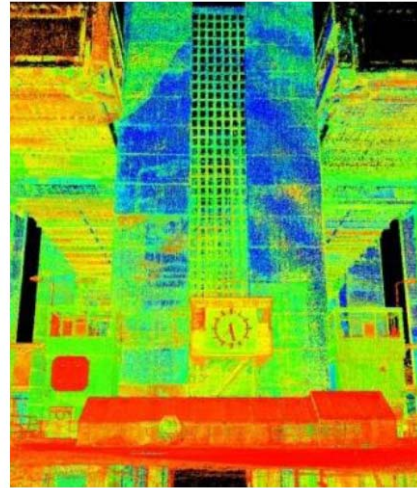
**Leibniztempel**  
Georgengarten  
Hannover

3D- Modellierung

Modellierung in der vollständigen Punktwolke



### 3D-Erfassung: Schiffshebewerk in Scharnebeck



Farbkodierung: Intensität  
des reflektierten Laserlichts

11

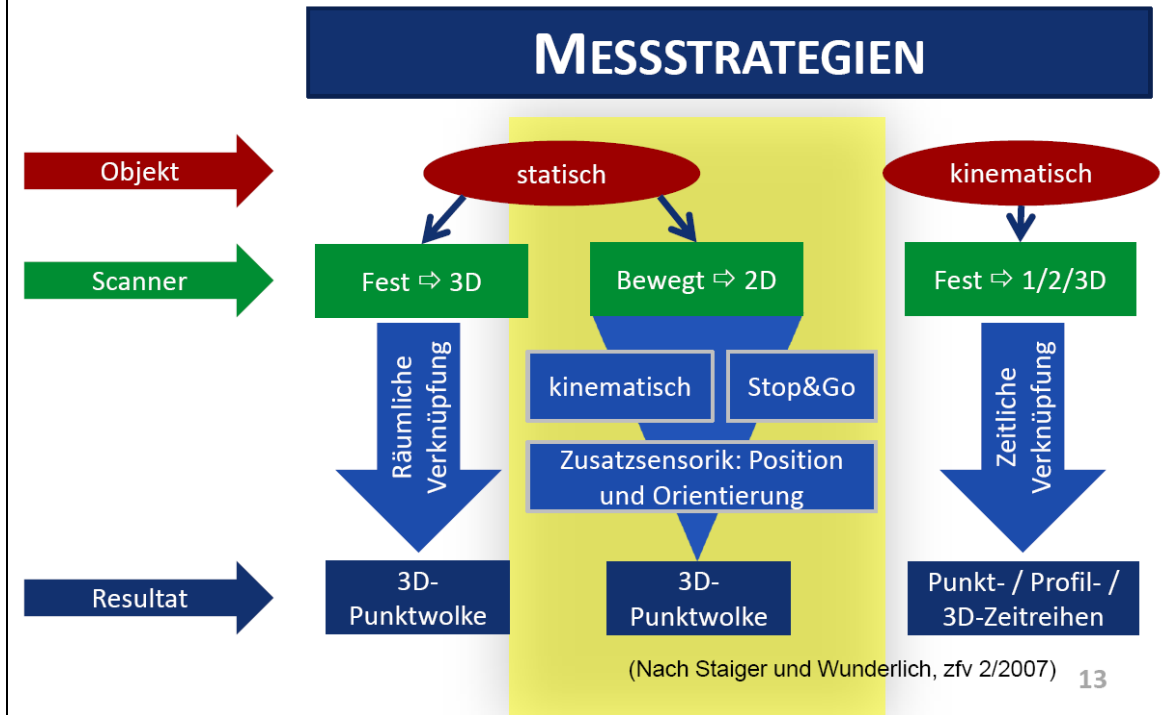
### 3D-Erfassung: Schiffshebewerk in Scharnebeck



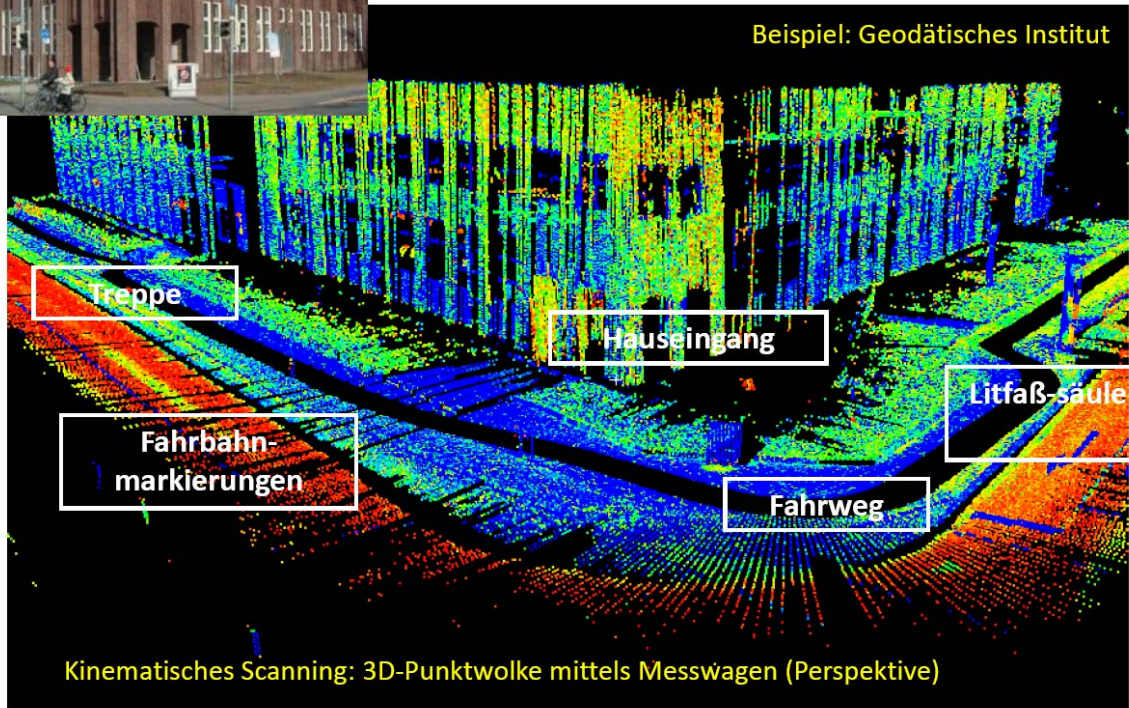
#### Rahmendaten

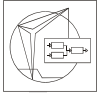
- 103 Standpunkte für den Leica HDS 4500 (ca. 80 davon unten und ca. 20 oben)
- Ca. 20 Mio. Punkte / Aufnahme
- Insgesamt mind. 2 Mrd. erfasste Punkte
- ⇒ Datenmenge: 35 GB
- 3 Messtage

12

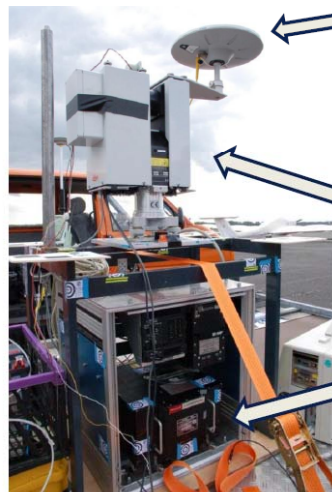


## Beispiel: Scanner bewegt Mobile Mapping





### Integration von TLS/GPS/IMU



GPS

Messrate 1Hz  
Zeitsynchronisation der Sensoren  
Positionierung

Terrestrischer Laserscanner

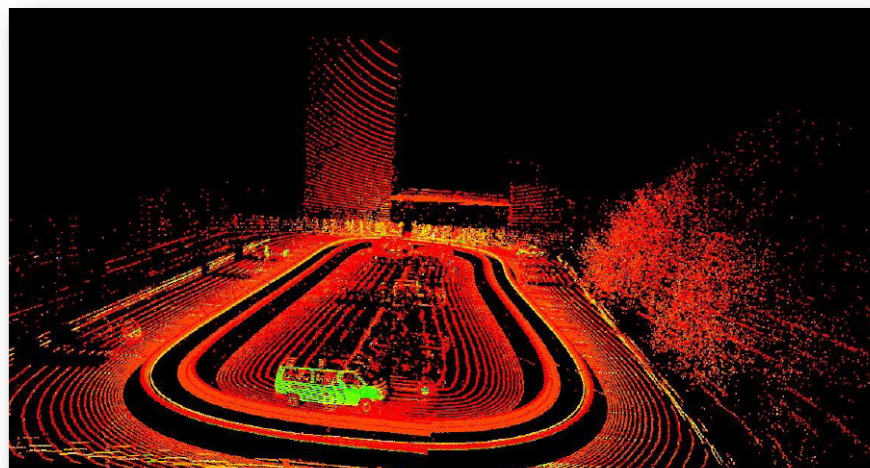
Leica HDS 4500  
33 Profile/s (10.000 Pixel/Profil)  
2D Profile

IMU (Inertial Measurement Unit)

Honeywell Lasernav II  
Messrate 50 Hz  
Ring Laser Kreisel  
Äußere Orientierung

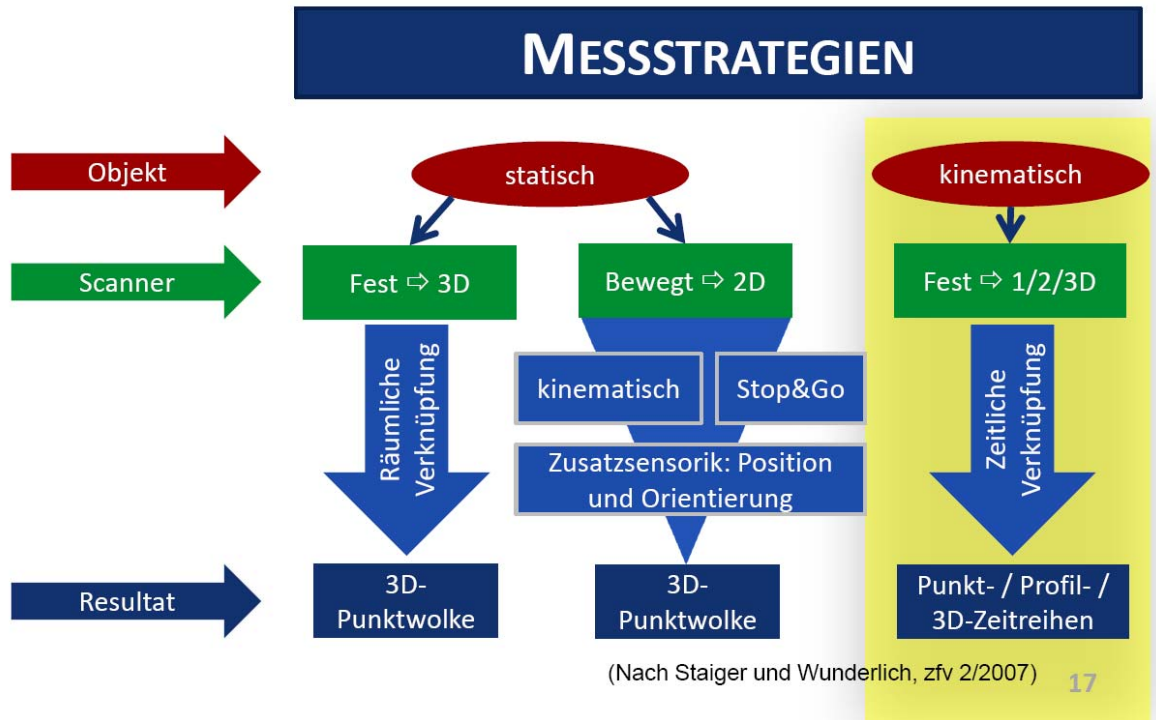
15

### Integration von TLS/GPS/IMU



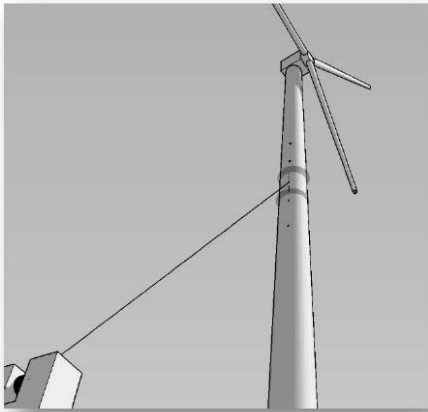
Punktwolke mit Trajektorie

16

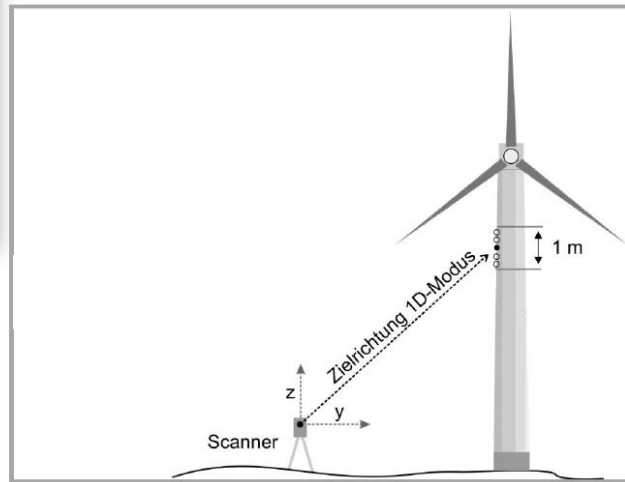


## Beispiel: Objekt bewegt

### Bewegung des Pylons einer Windenergieanlage



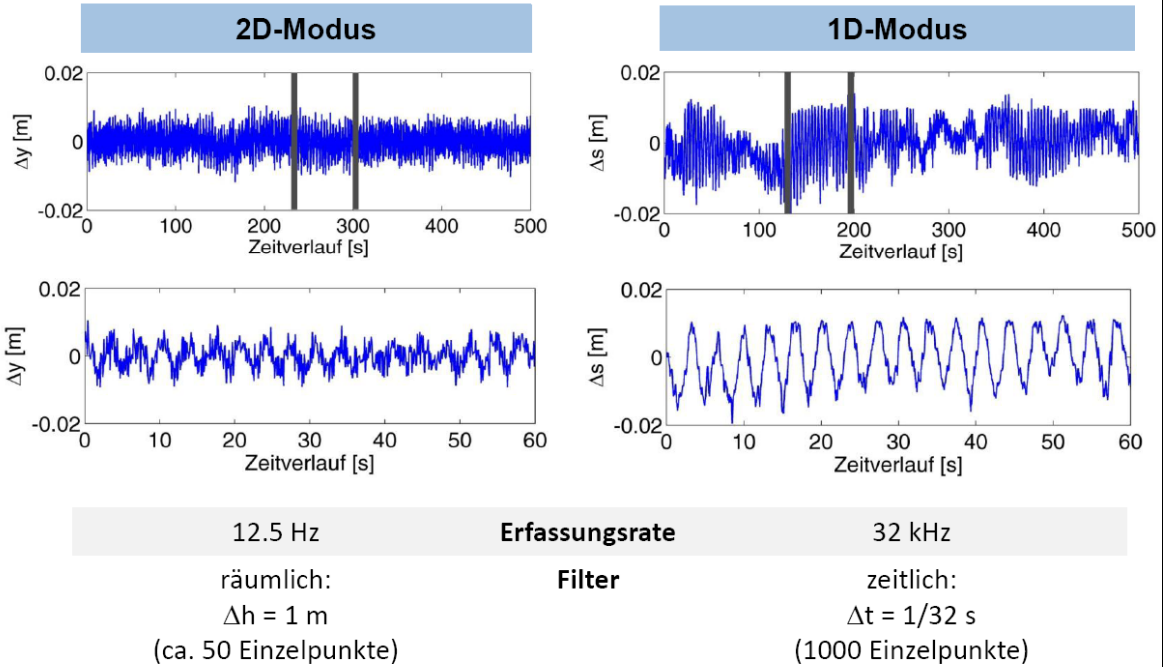
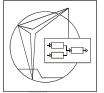
Vergleich 1D-2D





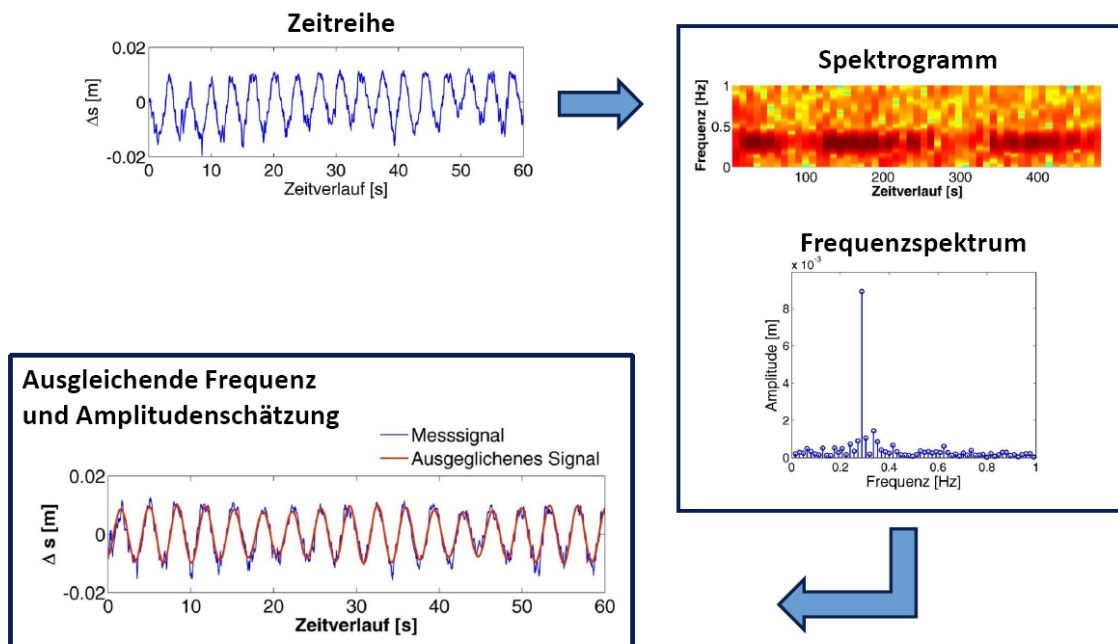
# Beispiel: Objekt bewegt

## Vergleich Zeitreihe: 2D-1D



# Beispiel: Objekt bewegt

## Auswertung Zeitreihen





### Heute

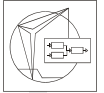
- zeitliche Identifikation
- automatische Registrierung bei ausreichend strukturierter Topographie
- automatische Identifikation und Parametrisierung begrenzt komplexer Objektformen
- Vernetzung von Positionssensoren
- Fernsteuerung der Sensoren

21

### Zukünftig?

- generelle automatische räumliche Registrierung
- automatische Identifikation und Parametrisierung beliebiger Objektformen
- Integrierte Positionslösungen bei vernetzten Sensoren
- weitere Sensorik (z.B. zur Objektidentifikation (RFID),...)
- semantische Datenkompression
- ...

22

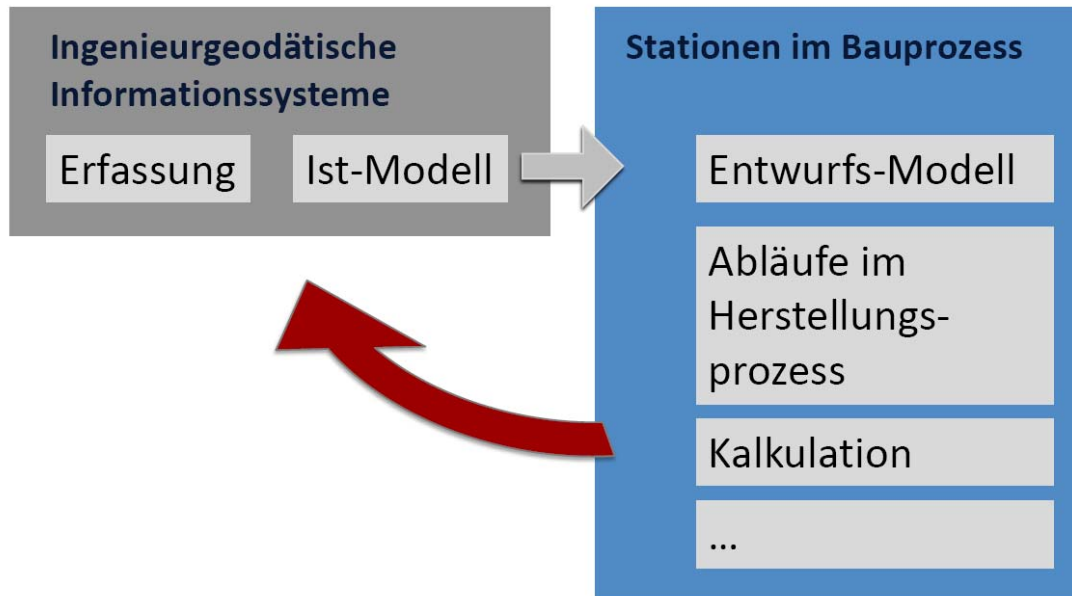


- Eindeutige zeitliche und räumliche Identifikation?
- Persistenz des Koordinatenrahmens?
- Reduktion des Datenvolumens?
- angepasste Analyse- und Auswertelgorithmen?
- Qualitätsbeschreibung?

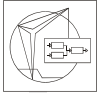
23

<b>Erfassungsseitig</b>	<b>Modellseitig</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• absolute Orientierungssensoren investitionsintensiv (&gt; minimieren)</li><li>• referenzierte Positionierung im Innenbereich</li><li>• Verwendung von Low-Cost-Sensoren</li><li>• ...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Prozessieren großer (unstrukturierter) Datenmengen</li><li>• Qualitätsangaben auch für modellierte Objekte</li><li>• Nutzung von (Farb-) Intensitäten für Modellierung</li><li>• ...</li></ul>

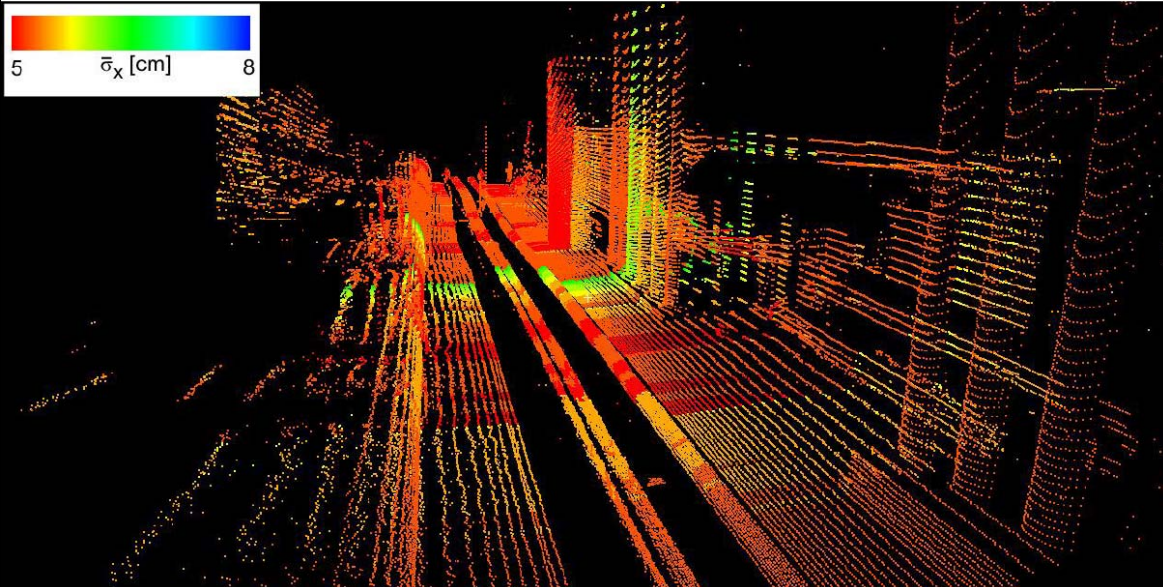
24



- **Zentrale Datenhaltung** und Prozessierung
- **Integration** von Ist-Modell (Bauwerk und Umgebung) und Abgleich zum Entwurfs-Modell
- **Aktualität** der Modelle
- bedarfsabhängige räumliche und zeitliche **Auflösung**
- **Qualitätsbetrachtung** (z.B. probabilistisch)



## Beispiel Qualitätsbetrachtung



Intensität entspricht mittlere Koordinatengenauigkeit

27

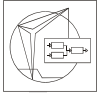
### Optimaldesign der geodätischen Mess- und Auswerteprozesse

#### Lean Surveying

- Dedizierte (prozessintegrierte), vernetzte Konfiguration
- Minimal invasive Messabläufe
- Adaptive Parametrisierung des Scanprozesses
- Effiziente Auswerte- und Analysealgorithmen
- Durchgängige Einhaltung geforderter Qualitätskriterien

28





# Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3-D CAD Daten

## Gliederung

- Einleitung
- Stand der Forschung in der Baulogistik
- Systemanalyse Baustelle
- Modellbeschreibung
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick



## Hintergrund

- Nach 10 Jahren Krise bzw. Strukturwandel sind positive Zahlen aus der Baubranche zu vermelden
- Starke Zergliederung der Bauaufgabe in einzelne Gewerke und viele Akteure
  - Spezialisierung
  - Ausstattung von Gebäuden
- Geringe Innovationskraft
- Aufgrund der besonderen Bedingungen im Bauwesen nur geringe Übertragungsmöglichkeiten aus anderen Industrien
  - Einzelfertigungscharakter, temporäre Produktionsstätte usw.





## Zielsetzung

Ziel war es, ein simulationsgestütztes Verfahren zur Beurteilung verschiedener Logistikstrategien auf Baustellen zu entwickeln.

- Unter folgenden Voraussetzungen:
  - Berücksichtigung der individuellen Baumaßnahme
  - Vor Beginn der Erstellung
  - Unter Verwendung bereits vorhandener Daten
  - Wiederverwendung der entwickelten Elemente
  - Berücksichtigung unscharfer Randbedingungen

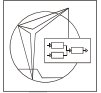


## Gliederung

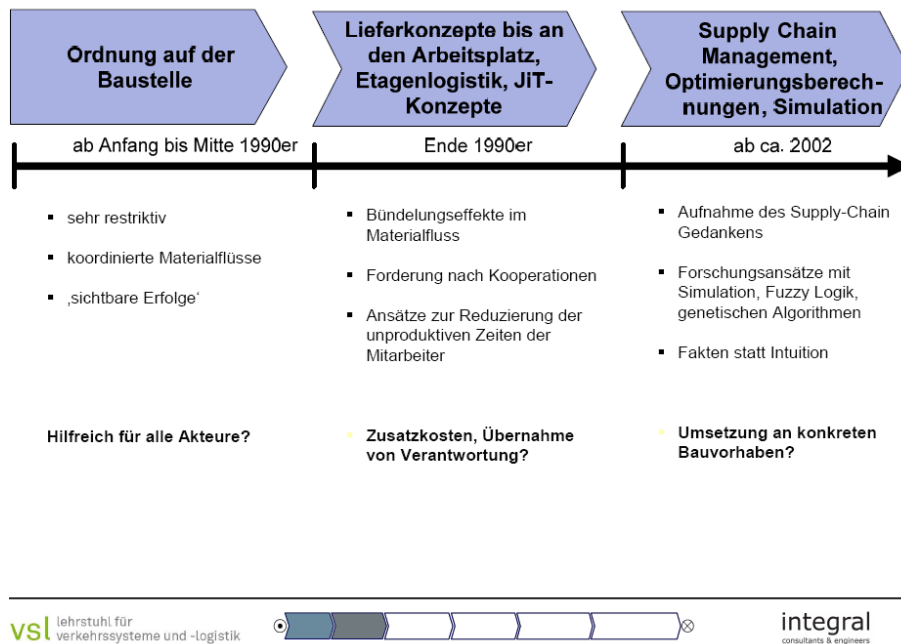
- Einleitung
- **Stand der Forschung in der Baulogistik**
- Systemanalyse Baustelle
- Modellbeschreibung
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick







## Stand der Forschung



## Trends in der Forschung

- Deskriptive Ansätze
  - Beschreibung eines Leistungsbildes
  - Prozessorientierung (Logistikprozesse unterstützen Fertigungsprozesse)
  - Juristische und vertragliche Rahmenbedingungen
- Technologische Ansätze
  - RFID im Bauwesen
  - Mobile Computing
  - Photogrammetrie
- Datenmodelle
  - 4D und 5D-Modelle
  - Simulation



## Gliederung

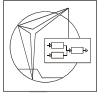
- Einleitung
- Stand der Forschung in der Baulogistik
- Systemanalyse Baustelle
- Modellbeschreibung
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick



## System Baustelle

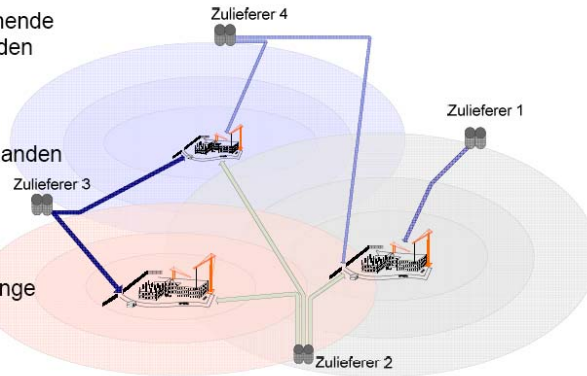
- Einzelfertigung des Produktes (Bauwerks)
  - Einmaligkeit (Gestalt, Funktion)
  - Prototypcharakter
  - vorwiegend manuelle Fertigung
  - Gründungsverhältnisse (Bodenbeschaffenheit)
- Produktion vor Ort
  - Temporär
  - Häufig im öffentlichen Raum
- Trennung von Planung und Ausführung
  - Unterschiedliche Zielsetzung der einzelnen Akteure





## Wegeermittlung (global)

- Aus Sicht der Lieferanten ergeben sich durch den temporären Charakter ständig neu zu planende Routen zu den n zu betreuenden Senken
- Je nach Material sind unterschiedliche Quellen vorhanden
- Kurzzeitige Reaktionszeiten erforderlich
- Auf Grund der Datenlage geringe Vorplanung möglich

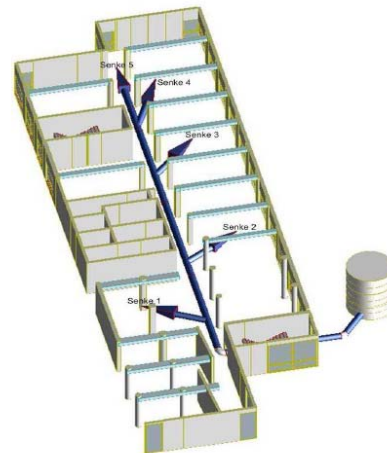


Baustellen stellen in der Regel hohe Anforderungen an die Distributionslogistik von Baustoffen.



## Wegeermittlung (lokal)

- Materialfluss ist dynamisch (Lage der Senken ändert sich)
- Bauwerk „wächst“
- Veränderungen der Baustelle
  - Zufahrtswege
  - Funktionsflächen (Ort, Größe)
  - Änderung der Materialien und Personen über die Bauzeit (Bauphasen)



Die individuelle Wegeermittlung in Abhängigkeit der Zeit ist wesentliche Aufgabe der Logistiksimulation.





## Datenlage im Bauwesen

- Großteil der Planung erfolgt immer noch in 2D
- Medienbrüche bzw. unzureichende Schnittstellen
- Mehrfacherhebung von Daten (Redundanzen)
- Baubegleitende Planung
- Hohe Planungsdynamik
- Juristische und vertragstechnische Schwierigkeiten

Die technischen Voraussetzungen für eine integrierte 3D-Planung sind gegeben.

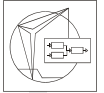


## Randbedingungen für Logistikstrategien im Bauwesen

- Strategien sind stark abhängig von den individuellen Restriktionen der Baustelle
  - Zufahrtssituation
  - Potentielle Lagerfläche vor Ort
  - Art des Bauverfahrens
- In der Regel ist die vorhandene Lagerfläche der limitierende Faktor in der Planung
  - Bestimmung der ‚optimalen Bestellmenge‘ eher selten
- Bündelung von Lieferungen sind problematisch
  - Viele Materialien erfordern Spezialtransporte

Es lassen sich keine einheitlichen Logistikstrategien ableiten, ohne das individuelle Bauvorhaben zu berücksichtigen.



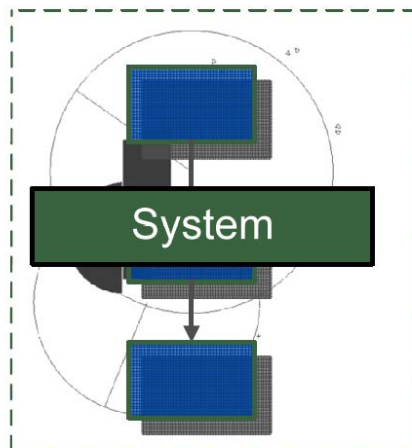
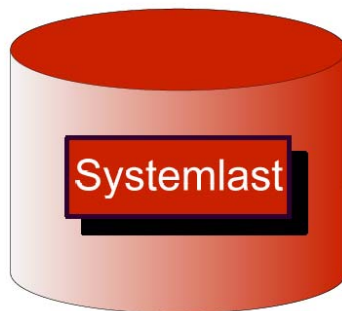


## Gliederung

- Einleitung
- Stand der Forschung in der Bauleistik
- Systemanalyse Baustelle
- **Modellbeschreibung**
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick

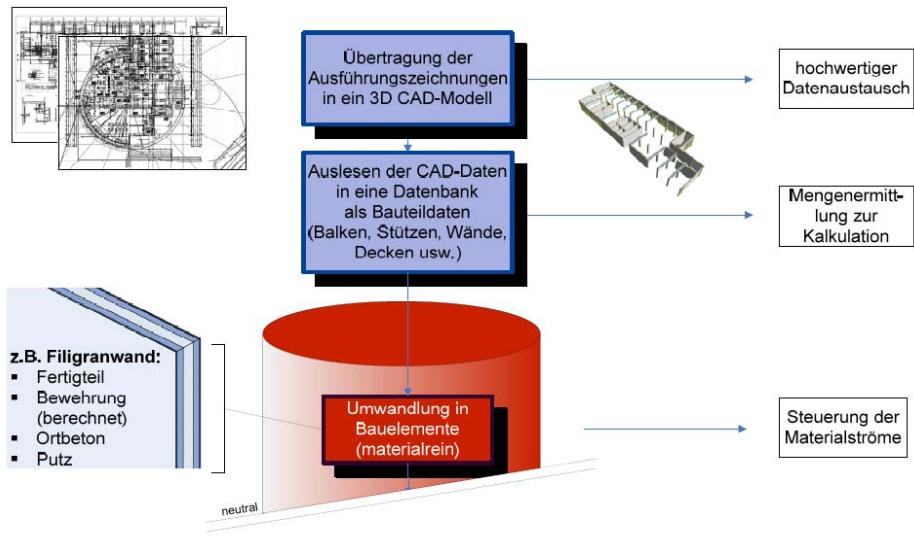


## Simulationsmodell

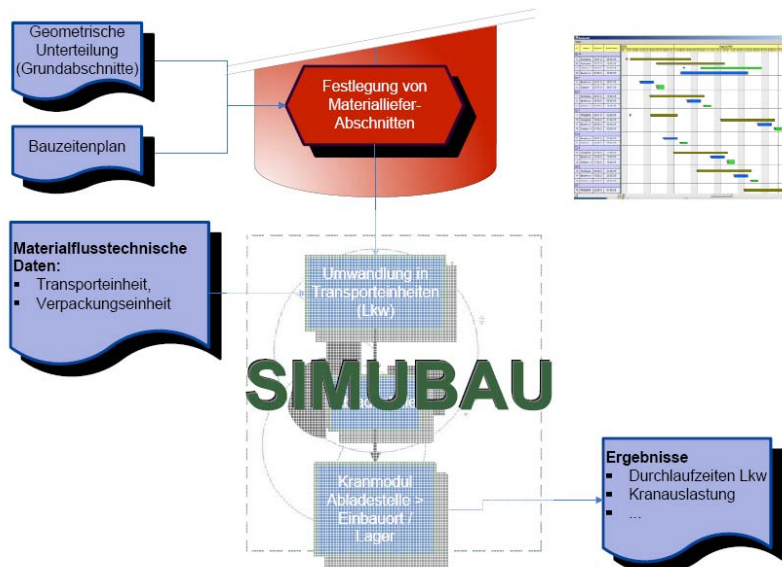


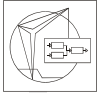


## Grobablauf der Modellbildung I

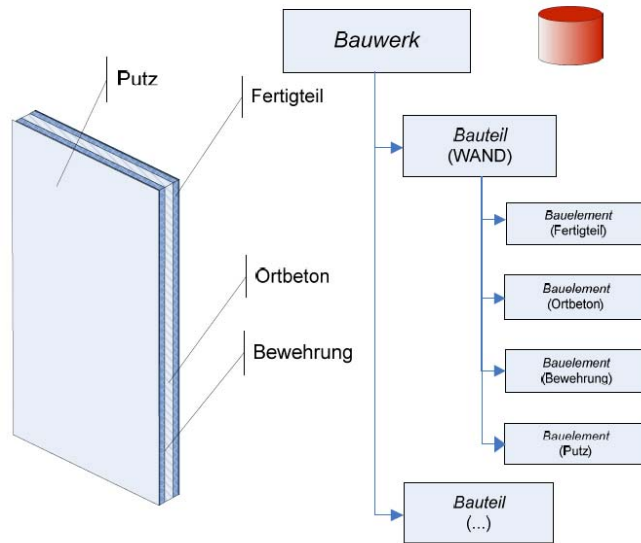


## Grobablauf der Modellbildung II

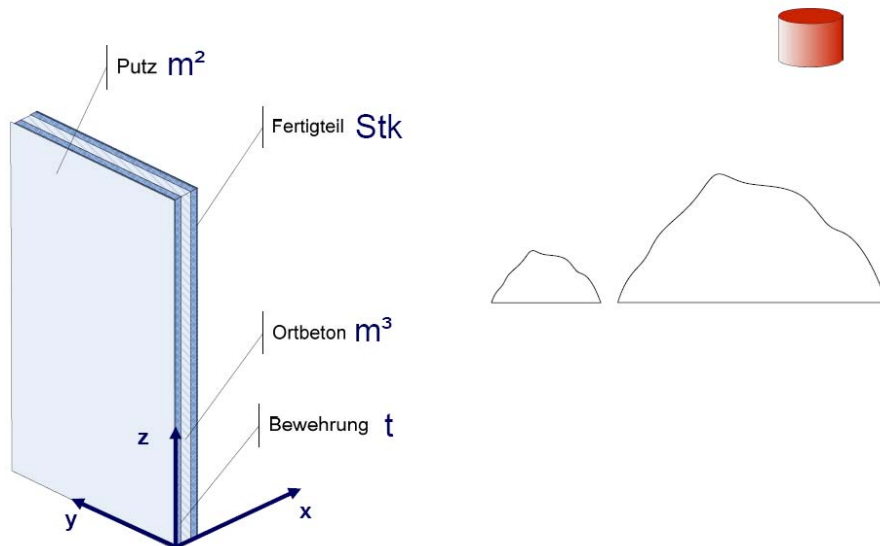




## Eigenschaften der Bauelemente I: Material



## Eigenschaften der Bauelemente II: Menge & Ort





## Aufbau einer Logistikdatenbank

- Materialabhängige Ressourcenleistungen
  - Maximale Umschlagmenge
  - Maximale Transportmenge
- Logistische Stammdaten
  - Maße (der Liefereinheiten), Lagerplatzbedarf
  - Gewichte
  - Morphologische Eigenschaften (Empfindlichkeit,...)
  - Verschnitt
  - Abfall



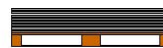
Steine (m<sup>3</sup>)



Ortbeton (m<sup>3</sup>)

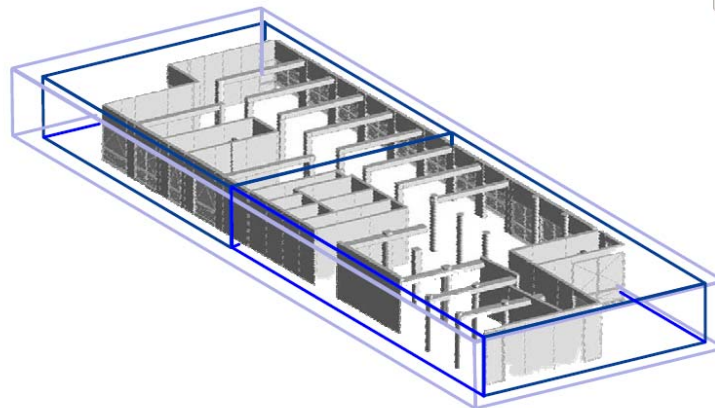


Trockenwand (m<sup>2</sup>)



## Eigenschaften der Bauelemente III: Zeit

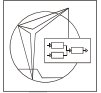
- Materialliefer- und Arbeitsabschnitte



Durch die Eigenschaft Zeit wird die Systemlast terminiert, d. h. sie ist nicht mehr neutral.





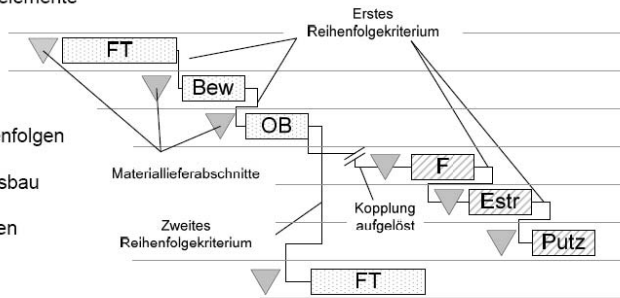


## Kopplung der Arbeitsabschnitte

### ▪ Aufgabe der Terminplanung



- Vorgänge bestimmen
  - Definiert durch die Bauelemente
- Abhängigkeiten definieren
  - Freie Anfänge
  - Eindeutige Einbaureihenfolgen
  - Trennung Rohbau - Ausbau
- Dauer der Vorgänge festlegen
  - Aufwandswerte
  - Ergebnisse der Simulation

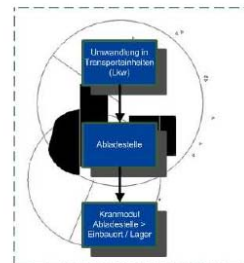


Im System werden zwei unabhängige Reihenfolgekriterien genutzt.



## Anforderungen an den Simulator SIMUBAU

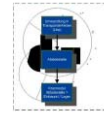
- Strukturorientiert, da die Wegfindung ein wesentliches Kriterium ist
- Modular, um Bausteine für weitere Projekte wieder zu verwenden (Bibliothek)
- Anpassbar, damit die individuelle Baustellensituation über Parameter einfach abgebildet werden kann
- Schnittstellenfähig, zur Nutzung vorhandener Daten





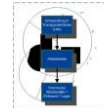
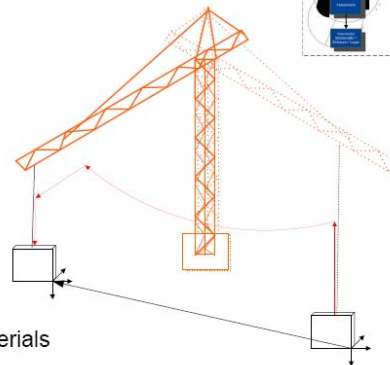
## Die Modellbausteine I

- Lkw-Beladung
  - Sortierung nach Material und Zeit
  - Zuordnung der Bauelemente in Abhängigkeit der Gesamtmenge für jeden Materiallieferabschnitt
- Einfahrt
  - Bestimmung des geeigneten Krans (Reichweite, Auslastung)
  - Ort beton bevorzugen
- Abladestelle
  - Bestimmung der Umschlagmenge
  - Festlegung des Ziels (Einbauort oder Lager)

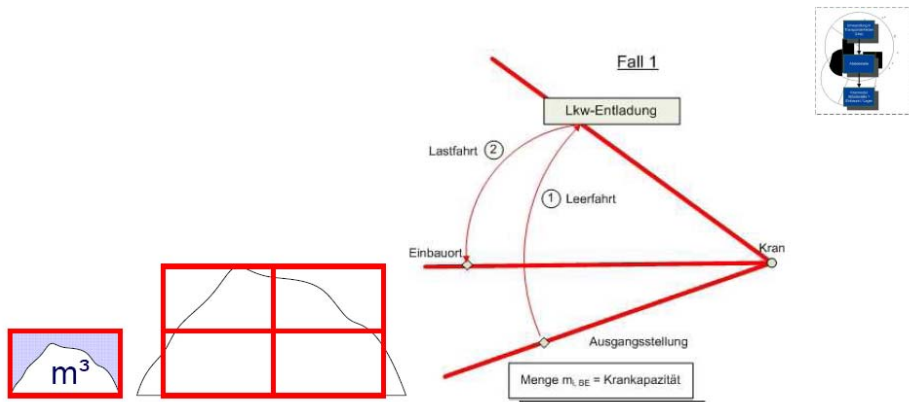
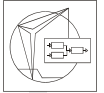


## Die Modellbausteine II

- Kran
  - Transport zu den Zielkoordinaten
  - Bestimmung der Kranspiele
- Lager
  - Bestimmung der Lagerflächenauslastung
  - Reihenfolge der Auslagerung
- Verarbeitung
  - Zeitverbrauch über Aufwandswerte des Materials
- Einbauort
  - Einbaustatusprüfung
  - Steuerung der Lkw und der Läger



## Auswirkungen unterschiedlicher Mengen am Beispiel des Krans



- Ein Bauelement korrespondiert nicht zu einem Kranspiel
- Etwaige Differenzen müssen als Restmengen oder Teillastfahrten berücksichtigt werden



## Gliederung

- Einleitung
- Stand der Forschung in der Baulogistik
- Systemanalyse Baustelle
- Modellbeschreibung
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick





## Das Anwendungsbeispiel I

### Hotelneubau Courtyard by Marriott Gelsenkirchen

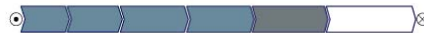
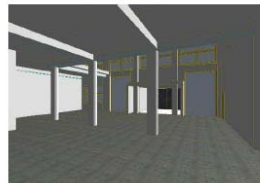
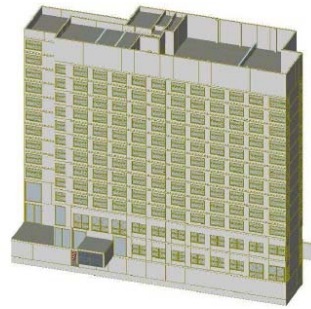
- 12 Stockwerke
- Fertigteile mit Ortbetonergänzung (Wände und Decken)
- Bauzeit von KW 11/2005 (Beginn Rohbau) - KW 13/2006 (Übergabe)

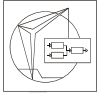


Zeichnungen: Kiemle Kreit und Partner



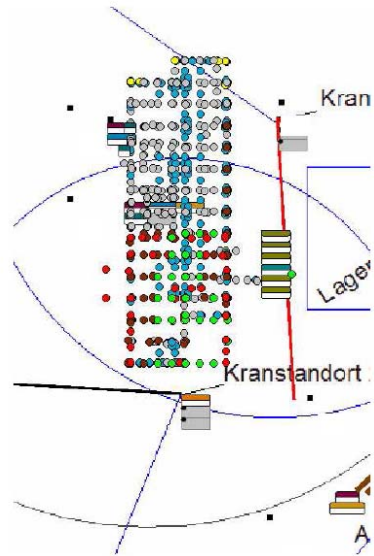
## Das Anwendungsbeispiel II



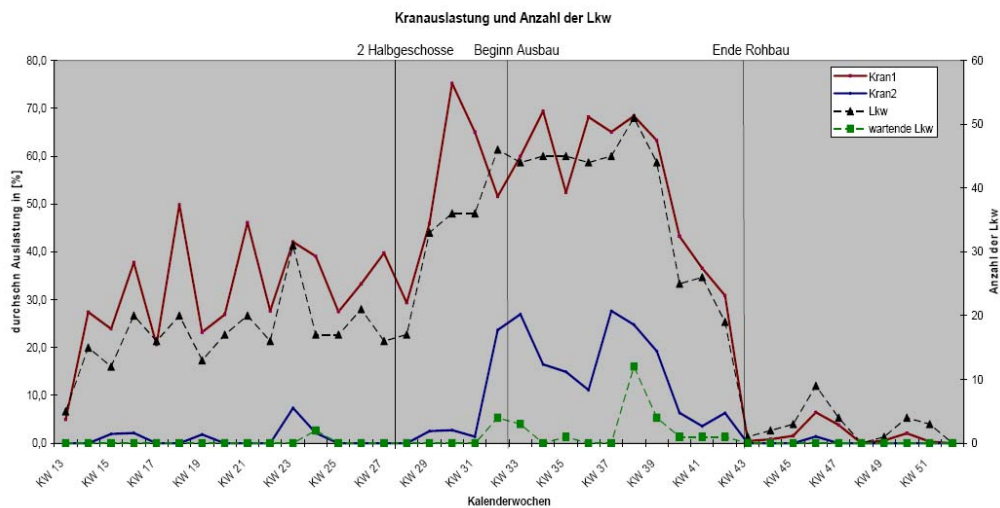


## Vorstellung verschiedener Varianten

- Systemlastneutral vs. systemlastverändernd
  - z. B. Änderungen am Layout oder
  - Änderung der Liefermenge im Intervall
- Variantenbildung
  - Minimierung der baustelleninternen Wege
  - Minimierung der Lkw-Durchlaufzeit
  - Bauzeitverkürzung
  - Verringerung der Kranreichweite



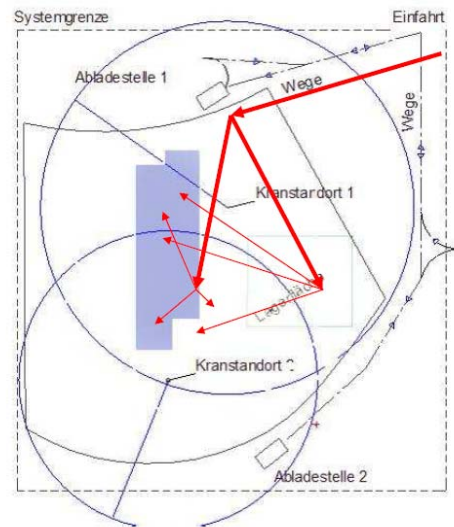
## Referenzsystem





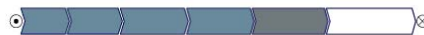
## Minimierung der baustelleninternen Wege I

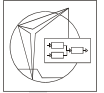
- Einführung von Etagenlagern zur arbeitsplatznahen Lagerung von Ausbau-Materialien
- Voraussetzungen
  - Modellierung von Etagenlagern mit begrenzter Kapazität und temporärer Existenz
  - Eintaktung der Materialien, solange die Läger per Kran erreichbar sind
  - Lieferung in das Lager mit der geringsten Lager-Einbauort-Entfernung



## Minimierung der baustelleninternen Wege II

- Ergebnisse
  - Die Wegeverkürzung beträgt ca. 18 % über alle Materialien (Der Gesamttransportweg der Fenster beträgt z. B. fast 15 km)
  - Die durchschnittliche Lagerdauer erhöht sich von 6 auf 44 Tage
  - Die erforderliche Lagerfläche erhöht sich von 55 auf 160 m<sup>2</sup>
- Fazit
  - Die Simulation liefert die Basisgrößen für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (kürzere Wege vs. größerer Lagerflächenbedarf und längere Lagerdauer)





## Minimierung der Lkw Durchlaufzeit I

tu technische universität dortmund

- Einführung von Lieferzeitfenstern und Optimierung der Lkw-Auslastung
- Voraussetzungen
  - Entzerrung der bevorzugten Anlieferzeiten in den frühen Morgenstunden und der Mittagszeit für Material ohne Lieferabruf
  - Direkteinbaumaterial ist nicht davon betroffen
  - Materiallieferabschnitte werden auf Lkw-Kapazitäten abgestimmt (Systemlaständerung)
  - Direkteinbaumaterial wird zwischengelagert

vsl lehrstuhl für verkehrssysteme und -logistik



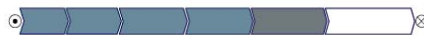
integral consultants & engineers

## Minimierung der Lkw Durchlaufzeit II

tu technische universität dortmund

- Ergebnisse
  - Lieferzeitfenster
    - Reduzierung sowohl der Anzahl wartender Lkw, als auch deren Wartezeit um ca. 12 bzw. 9 %
  - Optimierung der Lkw-Auslastung
    - Reduzierung der Anzahl der Lkw um 14 %
    - Leichte Erhöhung der Wartezeit von 11,5 auf 15 min
    - Deutliche Erhöhung der Lagerfläche
- Fazit
  - Lieferzeitfenster reduzieren zwar die Anzahl wartender Lkw, erst eine Verlagerung von Verkehren würde Wartezeiten vermeiden
  - Es muss ein Kompromiss zwischen Lkw- und Lagerauslastung gefunden werden

vsl lehrstuhl für verkehrssysteme und -logistik



integral consultants & engineers



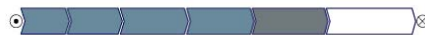
## Bauzeitverkürzung um 10 % I

- Alle Lieferzeitpunkte sind um 10 % nach vorne verschoben
- Voraussetzungen
  - Veränderung der Systemlast
  - Keine Änderung des Systems
    - Gleiche Leistungsparameter
    - Gleiche Strategien
  - Vorgängerabschnitte müssen weiterhin abgeschlossen sein, bevor neues Material eingebaut wird

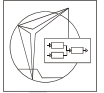


## Bauzeitverkürzung um 10 % II

- Ergebnisse
  - Höhere Gesamtauslastung der Krane (von ca. 35 auf 37 %), bei gleichzeitiger verbesserter Ausgewogenheit
  - Geringfügiger Anstieg des Lagerplatzbedarfs
  - Anstieg der Anzahl wartender Lkw und deren Wartezeit
  - Effektive Verkürzung der Bauzeit um 6,5 %
- Fazit
  - Das Logistiksystem zeigt große Leistungsreserven, die Kranauslastung ist auch unter Berücksichtigung nicht abgebildeter Transporte noch nicht an der Leistungsgrenze
  - Die effektive Verkürzung der Bauzeit deutet auf die Verarbeitung als Engpass







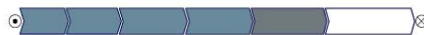
## Begrenzung der Kranreichweite I

- Die Reichweite des Nebenkrans wird so beschränkt, dass weniger Bauteile über diesen eingebaut werden können
- Voraussetzungen
  - Systemlast bleibt konstant
  - Manipulation der Parametereinstellungen beim Nebenkran
  - Das Einfahrtsmodul überprüft, welcher Kran die vom Lkw geladenen Bauteile einbauen kann



## Begrenzung der Kranreichweite II

- Ergebnisse
  - Die Anzahl wartender Fahrzeuge wächst fast mit dem Faktor sieben
  - Die Wartezeit steigt auf fast 30 min
  - Der Anteil der Krane an allen Transporten verändert sich nur marginal
- Fazit
  - Das System reagiert empfindlich auf Störungen der Flexibilität
  - Es kommt zu einer Umsortierung, nicht zu einer Verlagerung, der Kranfahrt - Aufträge
  - Flexibilität bezüglich der Materialfluswege ist ein wesentlicher Faktor





## Gesamtfazit und Übertragbarkeit I

- Flexibilität vor Leistungserhöhung
  - Das System reagiert empfindlich, wenn alternative Materialwege eingeschränkt werden
- Lieferentzerrung vor Liefersteuerung
  - In kritischen Zeitbereichen ist eine Vorverlegung von Lieferungen effektiver als die Einführung von Lieferzeitfenstern
  - Die Simulation zeigt kritische Zeitbereiche an
- Etagenlagerung vor Hauptlagerung
  - Die baustelleninternen Wege können signifikant reduziert werden

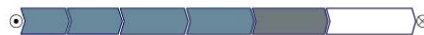


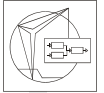
## Gesamtfazit und Übertragbarkeit II

- Das Logistik-System erweist sich als robust
- Die Leistungsgrenzen wurden nicht ausgeschöpft
- Die qualitativen Aussagen lassen sich im Wesentlichen auf andere Bauvorhaben übertragen
- Die Auslastung der Ressourcen lässt sich transparent darstellen
- Eine Reihe von Kenngrößen beschreibt die Leistung des Systems



Die Transparenz der Ergebnisse der Simulation ist Grundlage für das Finden einer geeigneten Strategie.





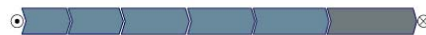
## Gliederung

- Einleitung
- Stand der Forschung in der Baulogistik
- Systemanalyse Baustelle
- Modellbeschreibung
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung und Ausblick



## Zusammenfassung I

- Zielsetzung der Arbeit ist die Entwicklung eines simulationsgestützten Verfahrens zur Bewertung von Logistikstrategien
- Drei Trends in der Forschung
- Die besonderen Randbedingungen lassen direkte Übertragungen der Stationären Industrie nicht zu
- Ableitung einer Systemlast von einem 3D-Modell
- Vorstellung der Modellbausteine zur Generierung eines Systems





## Zusammenfassung II

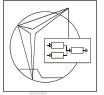
- Die Methode der Simulation ist auch für baulegitimistische Prozesse einsetzbar und liefert Ergebnisse, die die Planung im Vorfeld einer Baumaßnahme unterstützen
- Mit dem vorgestellten Simulator SIMUBAU lassen sich verschiedene Logistikstrategien miteinander vergleichen und beurteilen
- Die Ergebnisse unterstützen das Erfahrungswissen der Bauleitung und machen Zusammenhänge und Folgen von Entscheidungen transparent



## Ausblick

- Die Erweiterung der Baustein-Bibliothek von SIMUBAU ist sinnvoll
- Die Kombination der deskriptiven, technologischen und datenmodelltechnischen Ansätze ermöglicht eine integrierte Planung und Ausführung
- Die automatische Modellgenerierung aus einer 3D-Baustelleneinrichtungsplanung ist anzustreben
- Eine verfeinerte Beschreibung von Logistikstrategien im Bauwesen bietet Potenzial für weitere Forschung





## Montagestrategien und die Logik der Bauprozesse

---

### 1 Montagestrategien – warum?

Die Tätigkeiten auf einer Baustelle sind vielfältig und komplex, Bild 1. Dem Laien erschließen sich viele Vorgänge nicht auf den ersten Blick. Er hat häufig den Eindruck, hier werde das Chaos verwaltet. Auch Experten, darunter Bauherren, Nachunternehmer, aber auch Bauleiter- und Polierkollegen können häufig nicht sofort erkennen, nach welchem Schema oder nach welcher Strategie die komplexen Arbeiten ablaufen.

In diesem komplexen Gefüge – auf dem Bild ist der gar nicht einmal so schwierige Rohbau eines Hochbaus zu sehen – hält meist ein Bau- oder Projektleiter die Fäden in der Hand. Vielfach sind diese Fäden nicht einmal schriftlich niedergelegt, sondern werden die Anweisungen und die Regeln bezüglich Arbeitsrichtung und Arbeitspriorität nur mündlich festgelegt, z. B. in den wöchentlichen Baubesprechungen.



Bild 1 Rohbauarbeiten auf einer komplexen Hochbaustelle

Das Baugewerbe hat sich über viele Jahrzehnte zu der heutigen Form weiterentwickelt. Dabei wurden zwar auch technische Errungenschaften übernommen und eingebaut. Dennoch trifft auf die heutige Bautätigkeit in ihrer Gesamtheit zu, dass sie in ihrer traditionellen Form von einigen wesentlichen Hemmnissen geprägt ist. Diese sind z. B.:

- tradierte **Gewerkestruktur** von der Zuordnung in der Handwerksrolle bis zu Standard-Ausschreibungen

Gewerkeübergreifende Arbeiten – aus einer Hand – haben auf der Baustelle keinen hohen Stellenwert.

- vermeintliche Perfektionierung der vorhandenen (z. B. VOB-orientierten) **Vertragssysteme** und Regelungsmechanismen (Nachtragsmanagement)

Eine große Zahl von Beratern (juristisch, baubetrieblich und fachbezogen) lebt gut damit, dass es viele unkontrollierte Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Arbeiten gibt, die in Standardverträgen festgeschrieben sind.



- Trennung von **Verantwortlichkeiten** (in der Kette vom Investor bis zum Lieferanten)  
Wer für eine integrale Maßnahme verantwortlich sein will, muss sie auch in ihrer Tiefe und Komplexität durchdringen können. Das eröffnet Chancen für herausragende Bauleiter, erhöht aber die Risiken für durchschnittlich oder schlecht vorbereitetes Personal.
- umfassendes, aber **parzelliertes Erfahrungswissen** bei den Akteuren auf allen Hierarchiestufen  
Bauen ist äußerst komplex und braucht entsprechende Planung. Aufgrund der geringen Standardisierung im Bau ist viel Spezialwissen dezentral, parzelliert und manchmal widersprüchlich bei den einzelnen beteiligten Fachplanern und Fachfirmen vorhanden. Dieses lässt sich nur schwer auf einen Anwendungsfall zusammenfügen.
- unzureichende **Aggregation** von Bauprojektinformationen  
Bezogen auf das einzelne Projekt bestehen zwar sehr gute theoretische Modelle der zentralen Datenhaltung. Aber die Souveränität aller Beteiligten über das eigene Wissen und die entsprechenden Daten verhindert, dass die Beteiligten eines Projektes sich ausreichend gegeneinander vertrauen und öffnen.

Um diesen unbefriedigenden Zustand verändern zu können, muss zunächst gefragt werden, wie ein Bauprojekt realisiert werden soll. Gibt es eine eindeutige Zielfunktion für das Bauwerk? Kann dieses Ziel objektiv optimiert werden?

Nach Analyse vieler Bauverläufe muss die Antwort lauten: nein. Eine eindeutige Zielfunktion für ein Bauwerk existiert nur selten. Zwar möchte der Bauherr in der Regel ein funktional optimales, ästhetisch ansprechendes Gebäude zu angemessenen Kosten und in überschaubarem Zeitrahmen. Doch bei der Umsetzungen in die Monats- und Tagespläne ist dieses Ziel schwer zu fassen. Es verändern sich sogar die Teilziele immer wieder.

Wertigkeit \ Projektphase	wichtig	weniger wichtig	relativ unwichtig
Planung + Vergabe	Preis	Termin	Qualität
Bauausführung	Termin	Qualität	Preis
Abnahme + Nutzung	Qualität	Preis	Termin

Bild 2 Veränderung der Wertigkeit über die Projektdauer in den Augen mancher Bauherren

Bild 2 zeigt hierzu eine plakativ verkürzte Darstellung einer Zielfunktion mit den drei Teilzielen Zeit, Kosten und Qualität. Hierbei ist zu beobachten, dass diese drei Teilziele nicht in gleicher Gewichtung und Konstanz durch alle Phasen der Baurealisierung verfolgt werden. Ist zunächst, in der Planungsphase, die Qualität entscheidend, so gewinnt im Zuge der Auftragsvergabe häufig der Preis. Anschließend, in der Ausführungsphase, wird die Einigung über preisliche Differenzen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vertagt und herausgezögert, weil nun die Zeit bzw. die Termineinhaltung höhere Priorität hat. Denn das Gebäude soll pünktlich in Nutzung gehen – nicht zuletzt, um die aufgewendeten Kosten damit wieder einfahren zu können. Doch sobald das Gebäude fertig gestellt und bezogen ist, rücken die Qualitätsmerkmale erneut ganz nach vorn. Der Preis wird nachrangig, da ist noch einiges

mit Geduld nachzuverhandeln. Und die Terminsituation ist bereits mehr oder weniger zur Zufriedenheit gelöst.

Qualität, Preis und Termin lösen sich also in der Priorität nacheinander ab. Nur einem sehr souveränen und starken Bauherrn gelingt es, diese drei Ziele über die gesamte Planungs- und Bauzeit in ausgewogenem Verhältnis zueinander konstant zu verfolgen.

Wie kann man diese – teilweise ernüchternden – Erkenntnisse für die Entwicklung von Montagestrategien nutzen? Die Strategien müssen flexibel angelegt werden. Sie müssen in Form von vielfältigen Alternativen vorgehalten werden. Jeweils nach Vorgabe der Situation muss ggf. von einer Strategie auf eine andere umgeschwenkt werden. Dies führt direkt zu den Möglichkeiten der Simulation. Simulation erlaubt, mehrere alternative Lösungen bei bestimmter Wahl von Parameterkombinationen im Vorhinein durchzuspielen und die daraus resultierenden Konsequenzen aufzuzeigen.

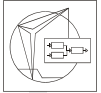
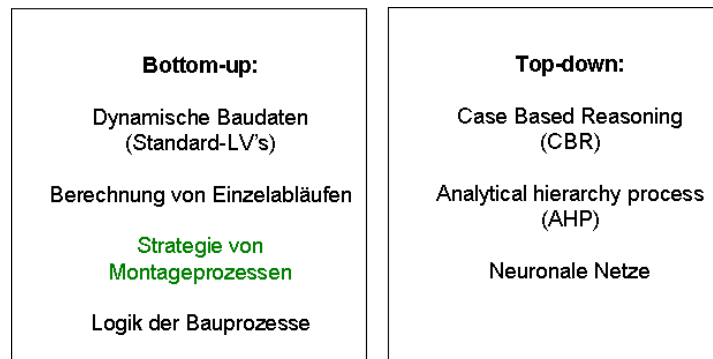


Bild 3 Entwicklungsansätze zur Simulation



Zur Simulation sind zwei grundsätzliche Entwicklungswege möglich: bottom-up und top-down. Bild 3 zeigt einige Verfahren für beide Wege. In Weimar werden vorrangig Ansätze nach dem Prinzip bottom-up verfolgt. D. h. die Prozesse werden in kleinen Schritten aufgearbeitet und das Gesamtbild wird durch Addition vieler Teilschritte beschrieben. Es ist offensichtlich, dass dieses weit weniger aufwendig ist, wenn man sich, wie in Bild 4 gezeigt, auf die relativ unabhängig steuerbaren Fassadenarbeiten an einem Hochhaus konzentriert. Bild 5 zeigt dagegen den komplizierten Umbau eines Altbaus, das Bauen von Haus in Haus, also die Ergänzung von umfangreichen Rohbaustrukturen innerhalb eines großen Stahlbetonkörpers. Hier ist bereits die Erfassung aller notwendigen Arbeiten extrem aufwendig und im Vorhinein fehleranfällig.



Bild 4 Fassadenarbeiten am Hochhaus Skyper, Frankfurt a. M.



Ziel der eigenen Forschungsansätze ist es, die typischen baubetrieblichen Fragestellungen so aufzubereiten, dass sie mathematisch und programmtechnisch erfassbar sind. Ein erster wichtiger Schritt ist die Definition möglicher Montagestrategien. Diese analysiert die Gedankengebäude von Ingenieuren in der Arbeitsvorbereitung und von Bauleitern vor Ort dahin gehend, nach welchen Ordnungsprinzipien sie welche Entscheidungen für den Baufortschritt treffen werden.



Bild 5 Umbau Weimar Atrium, Entkernung und neue innere tragende Struktur

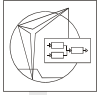
## 2 Freiheitsgrade zur Beschreibung von Strategien

Eingangs wurde darauf hingewiesen, dass die Zielfunktion eines Bauwerks häufig nicht eindeutig und deshalb nicht genau definierbar ist. Dieses trifft erst recht zu, wenn man die unterschiedlichen Perspektiven der am Bau Beteiligten betrachtet. Hier sind vereinfacht sechs unterschiedliche Perspektiven auf ein und denselben Bauprozess zu nennen:

- Die Perspektive des **Investors** zielt in erster Linie auf die von dem Bau beeinflussten Finanzströme, die Terminalsicherheit bei der Erstellung des Gebäudes und die Robustheit der Gesamtheit der Prozesse ab, damit nicht schon eine beliebige kleine Veränderung das Gesamtprojekt gefährdet.
- Die Perspektive des **Projektsteuerers** ergibt sich aus seinen Aufgaben. Er ist verantwortlich für die Überwachung von Terminen, Qualität und Kosten. Daher liegt sein Augenmerk bei allen Methoden der Planungsunterstützung auf der Kontrollierbarkeit der Vorgänge und auf guter Sichtbarkeit der Indikatoren für Fortschritt, Qualität und Budget.
- Die Perspektive des **Nutzers** geht häufig über die drei Kernbereiche Terminalsicherheit, Qualität, Kosten hinaus und umfasst eine hohe eigene Flexibilität in allen Phasen bis zum Nutzungsbeginn, um noch so lange, wie das Bauwerk veränderbar zu sein scheint, die besten Voraussetzungen für einen optimalen Betrieb zu schaffen.
- Die Perspektive des **Generalunternehmers** ist auf die technische Koordinierung bei gleichzeitig ausreichender finanzieller Kontrolle gerichtet. Je nach eigener Prägung und technischem Anspruch richtet er seine Aufmerksamkeit zusätzlich auf ausgewählte sensible Detailprozesse.
- Die Perspektive des **Einzelunternehmers** ist gegenüber den vorherigen Perspektiven deutlich verlagert und enger gefasst. Der Einzelunternehmer strebt eine höhere Verlässlichkeit der Rahmenbedingungen an, um seine technische Vorbereitung zu verbessern und damit auch die eigenen Arbeiten kontrollierter durchführen zu können.



- Die Perspektive des **Bauleiters** ist dagegen auf hohe Flexibilität ausgerichtet. Mit dieser Flexibilität will er die Baustelle gegenüber Änderungen und Störungen robuster machen. D. h. wegen immer zu erwartender veränderter Umstände ist er bemüht, stets mehrere Alternativen vorzuhalten, also möglichst große Dispositionsfreiheit im Falle von externen und internen Veränderungen zu haben.



Ein möglicher Weg, um Montagestrategien zu beschreiben, ist es, die inhärente Logik der technischen Abläufe zu erfassen [HUHNT]. Bei vielen Bauabläufen hilft diese Logik aber nicht weiter. So wird es allgemein als logisch bezeichnet, dass eine Stahlbetonstütze zunächst bewehrt und dann erst betoniert werden muss. Auch sollten die Stützen eines Geschosses hergestellt oder montiert werden, bevor die darüber liegende Decke ausgeführt werden kann.

Doch es ist im Einzelfall denkbar, zunächst eine Stahlbetondecke auf Hilfspfeilern zu bauen, um im Nachgang die endgültigen Stahlbetonstützen darunter einzuziehen. Dieses Verfahren ist sogar gar nicht selten und im Tiefbau unter dem Begriff Deckelbauweise bekannt.

Wenn die Logik der technologischen Prozesse nicht weiter hilft, greift als nächstes Kriterium die Wirtschaftlichkeit. Deckelbauweise ist teurer als eine offene Baugrube, weshalb sie nur dann gewählt wird, wenn andere Randbedingungen eine offene Bauweise verhindern.



Bild 6 Ausschnitt aus Luftbild Ferienhaussiedlung Linstow (aus google map)

Bild 6 zeigt eine Ferienhaussiedlung in Linstow an der Autobahn A19 südlich von Rostock. Diese äußerst regelmäßige Grundrissanordnung eines holländischen Investors legt nahe, auch die Bauabläufe nach einem einfachen Schema – z. B. im Uhrzeigersinn – zu planen. Bei genauer Betrachtung des Bildausschnittes ist aber zu erkennen, dass diese einfache Reihenfolge nicht strikt eingehalten wird. An den sechs Häusern mit weißem Dach im linken Teil des Bildes ist zu erkennen, dass diese sechs Ferienhäuser gleichen Fertigstellungsgrades an unterschiedlichen Positionen und nicht etwa direkt nebeneinander stehen. Trotzdem ist eine übergeordnete Ordnung sichtbar. So ist der rechte Kreis komplettiert, links sind es vorrangig die Häuser in der unteren Bildhälfte. Und auch die Bauvorbereitungen und die Fundamentarbeiten an den nächsten Gebäuden erfolgten gezielt nacheinander für den linken Kreis.



Bild 7 Feriensiedlung Kleinzerlang  
(aus google map)

Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus Kleinzerlang, ebenfalls einer in den letzten zehn Jahren neu angelegten Ferienhaussiedlung. Diese Anlage wurde von einem deutschen Architekten entworfen. Sie steht nicht einmal 50 km entfernt von der Anlage in Linstow.

Baubetrieblich ergeben sich kaum Unterschiede zwischen diesen beiden Bauprojekten. Ist in Linstow bereits eine Ablauffolge naheliegend, nämlich z. B. im Uhrzeigersinn, so kann in Kleinzerlang bereits durch willkürliche Bestimmung einer beliebigen Ablauffolge ebenfalls erreicht werden, dass die Baustelle ein Grundordnungsprinzip erhält und alle weiteren Bedingungen darauf abgestellt werden können. Bild 7 zeigt so eine willkürliche Folge, die sehr wirtschaftlich sein kann, sofern sie transparent und konsequent für alle Gewerke durchgehalten wird.

Wie wichtig eine konsequente Vorgabe eindeutiger Abfolgen im Falle von mangelnden technologischen Notwendigkeiten ist, hat das Hochhaus SKYPER verdeutlicht, Bild 4. Dort waren während der Bauausführung noch keine Mieter bekannt. Der Bauherr hatte demzufolge nur ein geringes Interesse daran, dass die Baufirma pünktlich fertig wurde. Daher wurde die Baustelle seitens des Bauunternehmens einem sturen vorgegebenen Schema unterworfen, das ganz simpel lautete: beginnend ab dem dritten Obergeschoss wird durch den Generalunternehmer alle zwei Wochen ein Geschoss übergabefertig hergestellt, abgeschlossen und versiegelt. Anderenfalls hätten sich die diversen Rest- und Nacharbeiten bald über die gesamte Bauzeit und über alle Geschosse ausgeweitet.

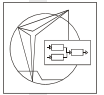
### 3 Beispiele geometrischer Beschreibung

Montagestrategien sind vordefinierte oder etablierte Anordnungen der Arbeiten. Sie beschreiben die aus technologischen (zwingenden) oder wirtschaftlich (zweckmäßigen) Abhängigkeiten heraus resultierenden Vorgabemuster für Fertigungsabläufe. Ziel ist dabei, diese Muster so herauszuarbeiten, dass sie nicht nur einmalig, sondern auch auf folgenden Baustellen möglichst sogar unterschiedlicher Art, zugrunde gelegt werden können.

In der Simulation werden Montagestrategien genutzt, um Ablaufalternativen zu untersuchen und geeignete Lösungen für die projektspezifischen Umgebungsbedingungen zu finden. Sie helfen, innerhalb des Lösungsraums die Suche nach geeigneten Lösungen einzugrenzen und alternative Strategien zu überprüfen. Ein Ziel ist es, durch die planmäßige Suche entlang verschiedener Montagestrategien eine günstige Ablauffolge für die Bauprozesse durch Parametervariation erreichen zu können.

Beispielhaft können Montagestrategien die Fertigungsrichtung innerhalb eines Gesamtprojekts beschreiben, also z. B. im Uhrzeigersinn, Bild 6. Sie können aber auch die Fertigungsreihenfolge inner-

halb eines Geschosses, eines Bauabschnitts oder innerhalb eines einzelnen Raumes vorgeben. In Bild 4 ist die Fertigungsrichtung vereinfacht mit „von unten nach oben“ beschrieben, was sich in einem Simulationsmodell einfach durch Sortierung entlang der z-Koordinate umsetzen lässt.



Montagestrategien, die auf den geometrischen Koordinaten beruhen, sind programmtechnisch einfach zu beschreiben. Sie benötigen keine zusätzlichen Wertungskriterien, da implizit bereits das Vorgehen entlang einer Ordinalskala des Koordinatensystems einen Reihenfolgevorschlag darstellt. Bild 8 zeigt ein Beispiel der grafischen Darstellung der prinzipiellen Fertigungsrichtung.

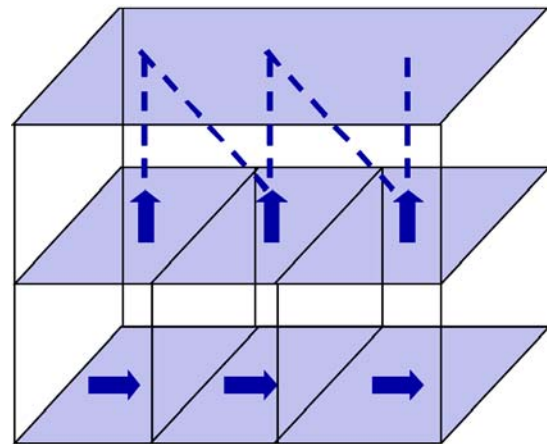


Bild 8 Beschreibung der Fertigungsreihenfolge

Dass sich nicht alle Bauwerke so einfach einer entsprechenden Ordnung unterwerfen lassen, belegt Bild 9. Bei diesem Beispiel, dem radikalen Umbau eines Plattenbaus, lässt sich wohl eine geometrische Ordnung der abzureißenden und der neu zu bauenden Teile des Rohbaus definieren. Überlagert wird dieses jedoch durch die Prämisse, dass aus Gründen des fehlenden Bauordnungsrechts hier im Schutze des Bestands zu arbeiten war. Die Traufhöhe durfte nicht einmal vorübergehend reduziert werden, ohne das Baurecht für ein Gebäude mit dieser bisherigen Bauhöhe zu verlieren. Das Beispiel belegt sehr anschaulich, wie drastisch einzelne und besonders gelagerte Randbedingungen die mögliche Anwendung einfacher Fertigungsreihenfolgen überlagern und einengen.



Bild 9 Umbau und Teilkernung eines Plattenbaus in der Breiten Straße, Rostock



Weil viele einfache Montagestrategien nur selten ohne Einschränkungen durchgesetzt werden können, kann man von der Priorisierung von Arbeiten sprechen. In Tabelle 1 sind einige mögliche Priorisierungen aufgeführt, die über die einfache geometrische Sortierung hinausgehen. Die hier angeführten Beispiele zeigen, dass durch die Priorisierung eine eindeutige Reihenfolge definiert wird. Sie ist aber nicht zwangsläufig auch die günstige, wie die Gegenbeispiele demonstrieren.

Tabelle 1: Priorisierung von Arbeiten in der Bauablaufplanung

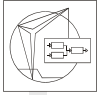
Prinzip der Priorisierung	Beispiel	Gegenbeispiel
„innen vor außen“	tragende Wandteile vor Wandputz und Elektroarbeiten	Kernbohrungen in Stahlbetondecke
„nass vor trocken“	Estricharbeiten vor Trockenbauwänden	Gipsputz vor Einbau von Holzfenstern
„schmutzig vor sauber“	Wandfliesen vor Fußbodenbelag	
„grob vor fein“	erst Herstellung der großen Flächen beim Werkstein, dann die Anarbeitungen der Ränder	Unterkonstruktionen für Verkofferungen von technischen Anlagen
„Abbruch vor Aufbau“	Entkernungsarbeiten in einem Altbau für den Umbau	Erhalt der alten Treppen als Zugang während der Umbauphasen
„kompliziert vor einfach“	erst Mauerecken anlegen und aufmauern, dann die Zwischenbereiche	erst die Großmengen des Leistungsverzeichnisses ausführen
„gerade vor gekrümmt“	die großen Abrechnungsmengen ausführen, Personal einsetzen	das Spezialpersonal steht zur Verfügung
„oben vor unten“	Montage von Deckenkanälen vor Fußbodenaufbau	

Die Auflistung in Tabelle 1 lässt sich beliebig verlängern. So sind z. B. Ordnungsmöglichkeiten realistisch nach den Prinzipien „Serie vor Einzelstück“, „warm vor kalt“, „lange vor kurzer Dauer“ usw. denkbar. Geometrische Größen beziehen sich, wie oben bereits angedeutet, auf die x-, y-, z-,  $\varphi$ - oder r-Koordinaten. Andere Reihenfolgen lassen sich nach physikalischen Merkmalen der eingesetzten Materialien prägen, wie z. B. nach der Gesamtmasse, dem spezifischen Gewicht, nach Oberflächen-texturen, Farbhelligkeiten u. v. m.

Aus dem Bereich der Logistik sind darüber hinaus noch andere Ordnungsprinzipien bekannt, wie z. B. die Reihenfolgebestimmung bei der Lagerhaltung (z. B. FIFO: first-in-first-out und LIFO: last-in-first-out).

Terminbezogene Priorisierungen könnten sein: „lange Dauer vor kurzer Dauer“, „getaktete Vorgänge vor Füllvorgängen“, „Zwangsfolgen schaffen“ oder im Gegenteil „Flexibilität schaffen“. Zwangsfolgen können dadurch etabliert werden, dass ein eng verzahnter Wochentakt eingerichtet wird, durch den die Selbstdisziplin und -kontrolle jeder Kolonne erhöht wird. Flexibilität wird dadurch erreicht, dass an möglichst vielen Arbeitspunkten die notwendigen Vorarbeiten vorgezogen werden, um dann jederzeit bei zusätzlicher Personalkapazität an mehreren Stellen gleichzeitig nachfolgende Hauptarbeiten durchführen zu können.

Schließlich haben die die Realität abbildenden Reihenfolgenmuster auch ganz banal wirkende Ereignisse zu berücksichtigen. So wird z. B. ein Vorarbeiter bei Dacharbeiten auf einer großen Dachfläche morgens nicht auf der Seite beginnen, die noch mit Nachtfrost oder Raureif belegt ist, sondern auf der anderen Seite, wo bereits die Sonne die Temperaturen über den Nullpunkt gebracht hat.



Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass eine flächenhafte Baustelle, wie z. B. die zweigeschossige Tiefgarage in Bild 10, ohne eines oder mehrere der vorgenannten Ordnungsprinzipien nicht zu strukturieren ist. Dabei unterscheiden sich Flächenbaustellen von Linien- und Punktbaustellen dadurch, dass bei letzteren die zwingenden Abhängigkeiten in der Regel größer und dominierender sind. Bei Flächenbaustellen benötigt ein erfahrener Bauleiter dagegen die künstlich eingepprägten Reihenfolgen, um den im Übrigen sonst beliebigen Terminen eine entsprechende Verbindlichkeit zu geben.



Bild 10 Baustelle doppelstöckige Tiefgarage Atrium Weimar

Ferner sind vorgeprägte Montagestrategien nicht immer durchzuhalten. In diesem Zusammenhang wird auf die Arbeiten von KÖNIG/BEISSERT/BARGSTÄDT sowie auf den Beitrag von KÖNIG/BEISSERT im ersten Teil der Tagung verwiesen.

Für in sich abgeschlossene Teilleistungspakete ist das Erfassen der zugrunde liegenden Entscheidungsabläufe von Montagestrategien vergleichsweise leichter zu erreichen. Bei größeren und komplexen Leistungspaketen unterliegt die Wahl der richtigen Strategie bisweilen auch der Struktur der Machtverhältnisse zwischen den am Bau Beteiligten. Bei Baustellen mit einem sehr starken und kompetenten Bauleiter für die Estricharbeiten konnte beobachtet werden, dass dieser quasi die zügige Ausführung aller Arbeiten der anderen vorhergehenden Gewerke regelrecht vor sich herreibt.

Um Bauprozesse logisch digital abbilden zu können, müssen die Fakten und Zusammenhänge über die Prozesse erfasst und aufbereitet werden. Dieses Wissen liegt bisher nur in den Köpfen von erfahrenen Bauleitern, Projektplanern und Polieren vor. Es fließt vielfach eher intuitiv in die Arbeitsvorbereitung ein. Die in ihm enthaltenen Grundideen, Methoden und Entscheidungsalgorithmen sind erst noch zu erfassen und für nachfolgende Bauprozesse aufzubereiten, also auch der programmtechnischen Beschreibung zugänglich zu machen.

Nicht alle Entscheidungen auf einer Baustelle sind logisch begründbar und demnach nicht zwingend. Daher ist es gerechtfertigt, auch rein formale, im baubetrieblichen Sinne eher „oberflächliche“ Entscheidungskriterien heranzuziehen. Damit dies aber nicht zu einer willkürlichen Umsetzung suboptimaler Lösungen führt, müssen die gefällten Entscheidungen und deren Alternativen transparent sein. Deshalb muss auch weiterhin ein Rückblick auf die verworfenen Alternativen und Parallelszenarien möglich sein.

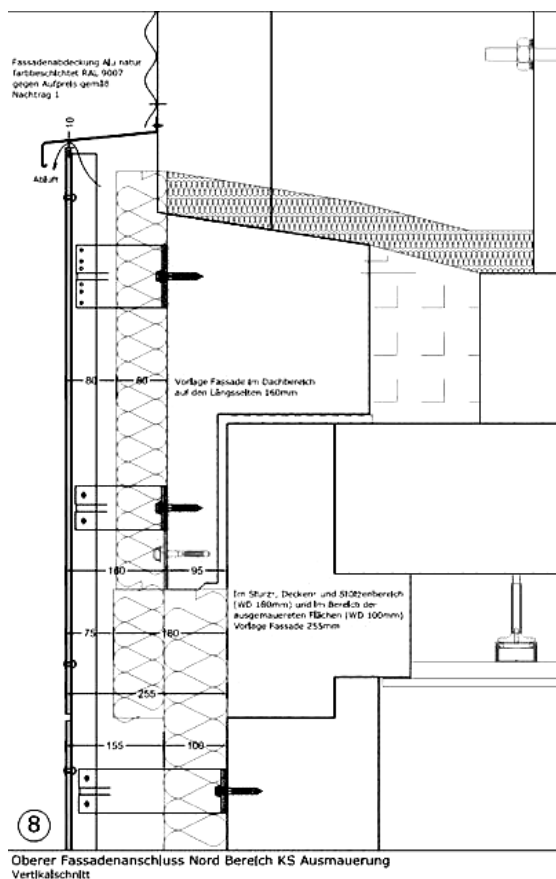
## 4 Ein konkretes Beispiel: zur Simulation von Fassadenarbeiten



Die Sanierung eines Plattenbaus wird als Anwendungsobjekt aufbereitet. Hierbei handelt es sich um eine Schule, die energetisch saniert und dazu mit neuen Fenstern, Wärmedämmung und vorgehängten Fassadenelementen modernisiert wird. Bild 11 zeigt eine Ansicht des Gebäudes. Es ist eine 5-geschossige Schule in Schwarzenberg im Erzgebirge mit ca. 1200 m<sup>2</sup> Fassadenfläche. Das neue Fassadensystem besteht aus den Aluminiumwinkeln, der mineralischen Dämmwolle, den Aluminiumprofilen und den eingehängten Fassadenelementen aus Faserzement. Bild 12 zeigt an einem Detail der Fassade den Aufbau im Schnitt.



Bild 11 SÜDANSICHT DER SCHULE SCHWARZENBERG/ERZGEBIRGE



Die auszuführenden Arbeiten sind im Wesentlichen unabhängig von anderen Arbeiten, da die Fenster bereits vorab erneuert wurden. Ferner können die Arbeiten in vier einfach zu gliedernde Bestandteile unterteilt werden: Aluminium-Montagewinkel andübeln (Bild 13), Wärmedämmplatten einschieben (Bild 14), Aluminiumschiene montieren und ausrichten (Bild 15), Fassadenpaneele aus Faserzement einsetzen.



Bild 12 Detail Fassadenausbildung (linkes Bild)

Bild 13 Montage Aluminiumwinkel (rechtes Bild)

Obwohl alle vier Vorgänge von der gleichen Kolonne durchgeführt werden können, unterscheiden sich die prinzipiellen Möglichkeiten doch deutlich.

Zum Setzen der Montagewinkel ist wenig Material zu transportieren. Winkel, Dübel und Bolzen können zu Beginn der Arbeitsschicht mitgeführt werden. Die Winkel können am Gebäude von oben beginnend oder von unten beginnend angedübelt werden. Sogar eine zufällige Vorgehensweise ist denkbar, sobald vorlaufend die Bohrpunkte aufgemessen und angerissen sind. Denkbar ist auch eine parallele Vorgehensweise mit mehreren Arbeitern auf Gerüstlagen übereinander (Bild 16).

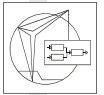


Bild 14 Montage der Wärmedämmplatten



Bild 15 Montage der vertikalen Aluminiumschienen

Die Wärmedämmung muss zunächst vorgeliefert werden. Die großvolumigen Pakete mit Platten der Abmessungen 1250 mm x 600 mm x 100 mm können über den Bordkran eines LKW oder über einen Schrägaufzug auf die Gerüstlagen gestellt werden. Hier verläuft der eigentliche Montagevorgang zügig, jedoch müssen die Platten zuvor einzeln oder in kleineren Stapeln horizontal über das Gerüst verteilt werden. Auch hier ist eine Montagereihenfolge von oben, von unten oder gleichzeitig horizontal parallel



auf mehreren Gerüstlagen denkbar. Bild 17 zeigt, dass die Materialanlieferung auf die von der jeweiligen Gerüstlage zu erreichenden Fassadenteile abgestimmt werden muss. Die Beispielfassade besteht aus Fensterbändern mit dazwischen angeordneten Bändern mit Fassadenplatten. Vor einigen Gerüstlagen liegen fast nur Fensterflächen, vor anderen nahezu ausschließlich geschlossene Fassadenteile. In Randbereichen sind die Dämmplatten zuzuschneiden, was zu erhöhtem Zeitaufwand führt.

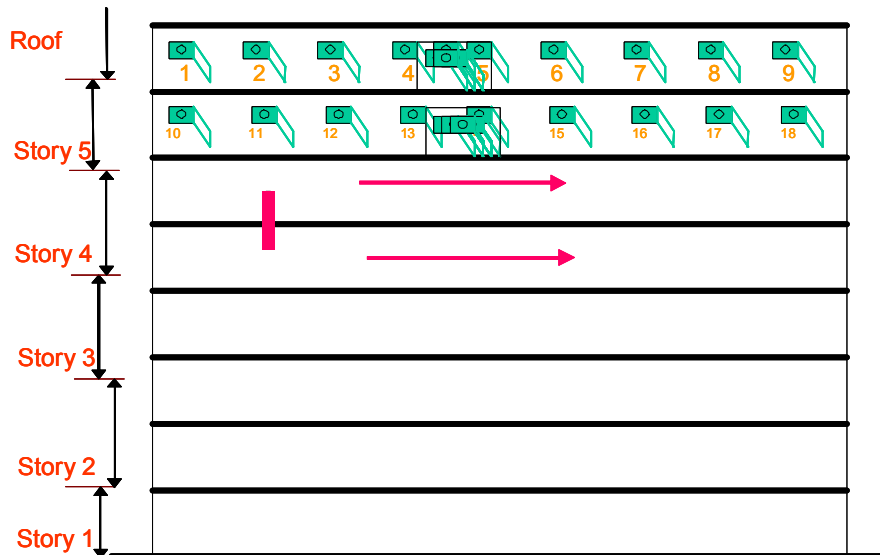


Bild 16 Mögliche Montagerihenfolge für die Aluminiumwinkel

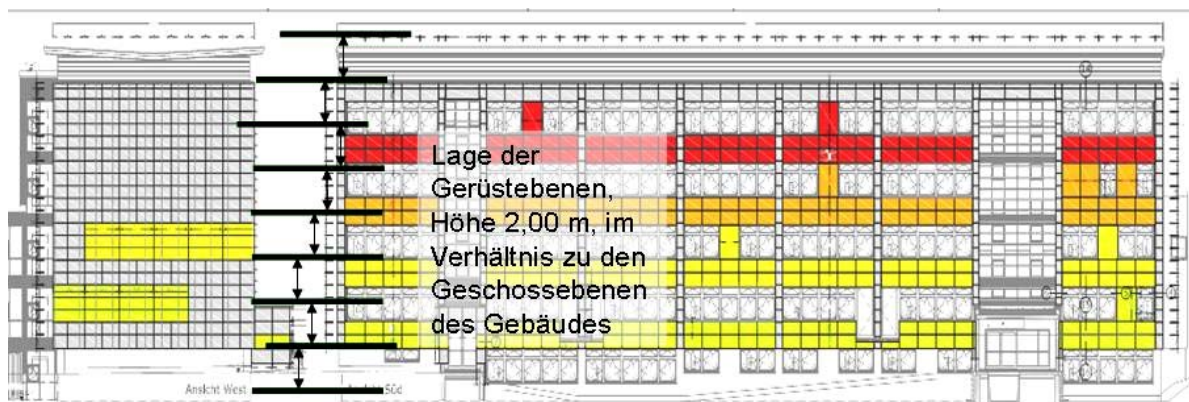


Bild 17 Diskrepanzen zwischen Geschosshöhen und Gerüstlagen

Die senkrecht zu montierenden Montageschienen sind entweder vor der Lieferung auf die Gerüstlagen oder oben auf dem Gerüst auf die richtige Länge zu kürzen. Bündelweise werden sie mit Hubgeräten auf die Gerüstlagen gesetzt und dort händisch verteilt. Um die Montageschienen besser ausrichten zu können, könnte sich eine vertikale Vorgehensweise als günstiger erweisen als eine horizontale.

Im letzten Arbeitsgang werden die Faserzementplatten eingesetzt. Standardabmessungen sind 700 mm x 1330 mm, 750 mm x 1330 mm und 770 mm x 1330 mm. In einem Montageplan wurden vorab die günstigsten Anordnungen für die verfügbaren Plattenabmessungen so gewählt, dass der werksseitige Verschnitt minimiert ist. Die Platten werden zu Paketen von jeweils fünf Stück in Schutzverpackung angeliefert und auf die Gerüstlagen gestellt.



Aufgrund der durch die Fenster zergliederten Fassade (Bild 18) sind auch hier die Platten so zu kommissionieren, dass nur die benötigten Elemente sowie die jeweiligen Paspstücke an den Übergängen bereit stehen. Es müssen also die zu montierenden Elemente auf die Geometrie der Fassadengestaltung, den gewählten Verlegeplan und auf die Anordnung der Gerüstlagen abgestimmt werden, wenn die Arbeiten in einem Simulationsmodell realitätsnah abgebildet werden sollen.

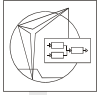


Bild 18 Fassadenansicht, Wärmedämmung und vertikale Aluminiumschienen montiert

Die konkreten Arbeiten bezüglich der Simulation von Fassadenarbeiten stehen zurzeit noch am Anfang. Sie werden im Rahmen einer Forschungsarbeit von Frau LE HONG HA an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren durchgeführt. Dazu ist das Vorgehen an diesem sehr gut isolierbaren und aus dem gesamten Bauprozess heraus zu lösenden Gewerk in vier großen Schritten geplant:

Schritt 1: Definition der üblichen Arbeitsschritte und Abbilden der durchgeführten Arbeitsschritte in einem Simulationsmodell durch

- Detaillierung in Teilarbeitsschritte,
- Übernahme der Reihenfolgeprinzipien und
- Belegen der Teilschritte mit Aufwands- und Materialwerten;

Schritt 2: Erweiterung auf mögliche Varianten der Ausführung, also:

- Einbau von alternativen Arbeitsverfahren und Reihenfolgen,
- Verifizieren der Aufwands- und Materialwerte,
- Vorhalten prinzipieller Entscheidungsmöglichkeit zwischen den Varianten;



Schritt 3: Vorhalten der Modellierung und der Varianten für zukünftige, neue Bauprojekte ähnlicher Ausprägung, um

- mögliche Varianten durchzurechnen und optimale Varianten zu ermitteln,
- die gewählte Ausführungsvariante für interne und externe Nutzer festzuschreiben und vorzuhalten,
- bei Änderungen und Störungen eine Arbeitsbasis für eine erneute Optimierung zu haben;

Schritt 4: Erhöhung der Komplexität durch Vernetzung mehrerer Gewerke, also:

- Vorhalten der differenzierten Tools für spezielle Baugewerke und Kombinationen mehrerer Gewerke,
- Einbringen der eigenen Algorithmen in eine gemeinsame Simulationsbibliothek.

Das Praxisbeispiel wird mit Unterstützung der Firma Dach-SCHNEIDER aus Umpferstedt bei Weimar durchgeführt. Ohne den intensiven Dialog mit dem Praxispartner gelingt der Einstieg in eine realitätsnahe Simulation nur schwer. Gerade weil die Bauleiter und Vorarbeiter viele tägliche Entscheidungen aus langjähriger Erfahrung bzw. aus Intuition fällen, ist ein vorrangiges Ziel der Modellbildung, dieses Know-How auf hohem Niveau detailliert zu erfassen. An dem überschaubaren und in sich abgeschlossenen Teilgewerk der vorgehängten Fassade kann diese große Menge an notwendigen Sachinformationen erfasst und abgebildet werden.

## Quellen

- [1] HUHNT, W. und ENGE, F.: Simulationsmodelle für die Ausführung von Bauleistungen. – In: Franz, V. (Hrsg.): 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, S. 29–50, kassel university press, Kassel 2007
- [2] KÖNIG, M., BEISSERT, U. UND BARGSTÄDT, H.-J.: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeitern – Konzept, Implementierung und Anwendung. – In: FRANZ, V. (Hrsg.): 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, S. 15–28, kassel university press, Kassel 2007
- [3] KÖNIG, M. UND BEISSERT, U.: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen. – In: BARGSTÄDT, H.-J. (Hrsg.): Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau (Heft 17/2008 der Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren), S. 17–36, Weimar 2008



