

*Integrationsaspekte der Simulation:  
Technik, Organisation und Personal*  
Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.)  
Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010

# **Konzepte zum effektiven Aufbau von Simulationsmodellen für die Unikatproduktion**

## ***Concepts for Effective Simulation Modelling of One-of-a-kind Production***

Dirk Steinhauer  
Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg (Germany)  
steinhauer@fsg-ship.de

Markus König  
Ruhr Universität Bochum,  
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Bochum (Germany)  
koenig@inf.bi.rub.de

**Abstract.** The simulation of production and logistics is rarely used in one-of-a-kind production today. The main reasons are the extensive effort currently needed for building the models and the lack of detailed data about the product in the planning phase. This paper presents concepts for the effective and efficient building of simulation models for the production of complex one-of-a-kind products and the generation of sufficient product data for this simulation. These concepts are being developed within the interbranch cooperation SIMoFIT (Simulation of Outfitting in Shipbuilding and Civil Engineering) and contain software components based on a constraint satisfaction approach. The concepts have been successfully implemented in shipbuilding already supporting planning tasks in steel production.

## **1 Einleitung**

Während die Simulation von Produktions- und Logistikabläufen in der stationären Serienproduktion eine gewisse Durchdringung erreicht hat, wird diese Technologie im Bereich der Produktion von komplexen Unikaten bisher nur vereinzelt angewendet. Im Schiffbau wird die Simulation seit Mitte der 1990er-Jahre u.a. bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG (FSG) an die Herausforderungen der Unikatproduktion angepasst und zur Unterstützung der Produktionsplanung eingesetzt (STEINHAUER 2006). Seit 2006 wird in der Kooperationsgemeinschaft SIMoFIT (Simulation of Outfitting in Shipbuilding and Civil Engineering) auch branchenübergreifend mit dem Bauwesen an dieser Aufgabenstellung gearbeitet.

Im Bauwesen wurden bisher nur vereinzelt und für ganz bestimmte Fragestellungen Fertigungs- und Logistiksimulationen durchgeführt. Zu nennen sind beispielsweise die Simulation von Linienfertigungen, wie im maschinellen Tunnelvortrieb (RUWANPURA u.a. 2001), einfache Prozesse wie dem Abbau und Abtransport von Erdaushub (CHAHROUR 2006) oder Fertigungsprozesse von Betonfertigteilen in Form einer temporären Fabrik. Häufig werden die Produktions- und Logistikprozesse auch für große Bauvorhaben nur auf Grund von Erfahrungswerten oder einfacher Annahmen analysiert und geplant. Verschiedene Varianten werden nicht geprüft. Insbesondere die Untersuchungen von möglichen Störungen oder die Optimierung der Prozessreihenfolgen unter Variation verschiedener Ressourcen finden nicht systematisch und nachvollziehbar statt. Nach Erkenntnissen der Autoren existiert jedoch ein großes Optimierungspotential, welches heutzutage nicht genutzt wird. Ein wesentlicher Grund für den geringen Einsatz der Simulationstechnik in der Unikatproduktion ist, dass heutzutage ein großer zeitlicher Aufwand beim Aufstellen von entsprechenden Simulationsmodellen betrieben werden muss. Bei der Unikatproduktion handelt es sich zumeist um Unikatprozesse mit einem hochkomplexen Wirkungs- und Abhängigkeitsgefüge. Für die Modellierung einer solchen Produktionsweise stehen aktuell keine kommerziellen Simulationslösungen zur Verfügung. Im Rahmen dieses Beitrages werden Konzepte vorgestellt, um den Aufbau von realistischen Simulationsmodellen für die Unikatproduktion effektiv zu unterstützen.

## **2 Besonderheiten beim Simulationseinsatz in der Unikatproduktion**

Im Gegensatz zur stationären Serienproduktion spielen strategische Prozessverbesserungen bei der Anwendung der Simulation in der Unikatproduktion eine eher untergeordnete Rolle. Im Fokus steht hier die Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. Eine wichtige Frage ist die Bewertung der Umsetzbarkeit und Robustheit von Produktionsplänen. Somit steht die grundsätzliche terminliche Machbarkeit im Vordergrund. Diese Bewertung erfolgt nicht nur vor Projektbeginn, sondern auch projektbegleitend, um geänderten Produktionsrandbedingungen oder Produktänderungen Rechnung zu tragen.

Die Unikatproduktion ist auch geprägt von vielen unvermeidbaren Produktionsstörungen, deren Auswirkungen aufgrund der Komplexität nur sehr schwer bewertet werden können. Mit Hilfe der Simulation kann der Einfluss möglicher Störungen durch Sensitivitätsanalysen untersucht werden. So können die für den Gesamtablauf kritischen Prozesse identifiziert werden. Typische Störungen des Produktionsablaufs sind fehlendes Material, mangelhafte Qualität von Einbauteilen oder Verzögerungen durch Schlechtwetterperioden. Diese Einflüsse können in der Regel nicht vollständig vermieden werden. Tatsächlich aufgetretene Störungen können mit der Simulation schnell auf ihre Auswirkungen untersucht und Kompensationsmaßnahmen bewertet werden. Maßnahmen werden heute auch ohne Simulation festgelegt, doch häufig erfolgt dieses ohne detaillierte Analyse. Somit haben Maßnahmen, wie beispielsweise Wochenendarbeit oder die Erhöhung des Personals, nicht den gewünschten Effekt oder sie sind überdimensioniert. Simulationen können dabei helfen, verschie-

dene Maßnahmen zu untersuchen und die zweckmäßigste und kostengünstigste zu ermitteln.

Bei der Unterstützung der Produktionsplanung komplexer Unikate können die Simulationsmodelle zumeist nicht aus anderen Projekten übernommen werden. Im Gegensatz zur stationären Serienproduktion, in der die Modelle der Produktionseinrichtungen für die Unterstützung der Produktionsplanung nur gepflegt und mit den aktuellen Systemlastdaten beaufschlagt werden, müssen die Simulationsmodelle in der Unikatproduktion mit jedem Projekt neu erstellt werden. Auch wenn grundsätzliche Teilabläufe aus vergangenen Projekten übernommen werden können, unterliegt jedes Projekt doch anderen Randbedingungen, welchen im Simulationsmodell Rechnung getragen werden muss. Beispielsweise erfolgt die Herstellung einer Wand in Ortbeton in der Regel in gleicher Art und Weise. In welcher Reihenfolge jedoch welche Wände hergestellt werden sollten, ist abhängig von projektspezifischen Gegebenheiten. Hierbei spielen das Baufeld, die Anlieferungskonzepte mittels Kran oder Betonpumpe sowie parallele Arbeiten eine wesentliche Rolle. Die Teilprozesse müssen unter den gegebenen Restriktionen zu einem effektiven jedoch einmaligen Gesamtablauf zusammengesetzt werden.

Im Gegensatz dazu kann in der stationären Serienfertigung der Gesamtablauf sehr genau manuell und mit einem entsprechenden Vorlauf festgelegt werden. Es werden feste Transportwege und Arbeitsstationen definiert, die anschließend in ein Simulationsmodell übertragen werden. Die Arbeitsstationen lassen sich in der Regel auch sehr genau steuern, und die Prozesse unterliegen wenigen Schwankungen. Die Modellierungsprinzipien der kommerziellen Simulationswerkzeuge sind sehr stark vom Einsatz in der stationären Serienfertigung geprägt: es wird zumeist von Materialfluss entlang von Produktionsressourcen ausgegangen, der dann mit entsprechenden Simulationsbausteinen nachmodelliert werden kann. Die Aufstellung von solchen Materialflussmodellen ist mit den verfügbaren Simulationsumgebungen in einem vertretbaren Aufwand zu bewältigen. Für komplexe Unikatprozesse existieren solche Simulationsbausteine bisher nicht in den kommerziellen Simulationswerkzeugen. Mit den vorhandenen Komponenten könnten zwar entsprechende Materialflüsse dargestellt werden, jedoch ist dies aufgrund des zeitlich veränderlichen Produktionsumfelds, einer Vielzahl von Vorgängen und sehr langen Projektzeiträumen in der Regel nicht innerhalb des Planungszeitraums realisierbar.

Neben der reinen Definition eines Simulationsmodells ist eine weitere wesentliche Herausforderung bei der Simulation von Unikatprozessen die mangelnde Verfügbarkeit von Simulationsdaten zum Produkt und zu den Prozessen während der Planung. Oft ist das Produkt zum Zeitpunkt des Produktionsbeginns noch nicht vollständig beschrieben. Auch die Vielzahl der Beteiligten ist bei der Datenaufbereitung ein großer Aufwandsfaktor. Die verschiedenen Partner liefern die notwendigen Daten in unterschiedlichen Formaten und Detaillierungsstufen. Diese müssen aufwendig für die Simulation aufbereitet werden. Zudem herrscht je nach Branche und Kunde ein hoher Änderungsanteil während der Produktion, dem in der Simulation Rechnung getragen werden muss. Die Bewertung der Auswirkungen von Produktänderungen auf den Produktionsablauf ist eine besonders wichtige Funktion beim Simulationseinsatz. Produktionsänderungen müssen heutzutage aufwendig manuell in die entsprechenden Simulationsmodelle eingefügt werden. Ändern sich komplette Produktionsmethoden oder Bauverfahren, müssen große Teile des Simu-

lationsmodells komplett neu erstellt werden. Sollen die Ergebnisse einer Simulation auf die reale Produktion übertragen werden, muss zuvor eine nachvollziehbare Verifikation und Validierung des entsprechenden Modells erfolgen. Die Validierung ist dabei äußerst schwierig, da die Produktion nur einmal durchgeführt wird und der reale Prozess häufig auf Grund der vielen Störungen und vorgenommenen Änderungen sehr hohe Abweichungen bezüglich der Simulation aufweist. Daher können in der Regel nur einzelne Teilprozesse validiert werden, und es muss mit einer gewissen Unsicherheit auf die Eignung des Modells zur Simulation des Gesamtablaufs geschlossen werden. Zur Anwendung der Simulation in der Produktionssteuerung ist das Aufsetzen auf den Fertigungsstatus erforderlich, um die aktuelle Situation der Produktion im Simulationsmodell zu berücksichtigen. In der stationären Serienfertigung kann der Fertigstellungsstatus sehr gut verfolgt werden, da die Maschinen und Teile zum einen eindeutig identifizierbar sind und zum anderen geringe Schwankungen der Fertigungszeiten vorliegen. Heutzutage ermöglichen Konzepte wie Barcode und RFID eine automatische Rückverfolgung, welche sich im Rahmen der Unikatprozesse allerdings noch nicht im erforderlichen Maß durchgesetzt haben. In der Unikatproduktion wird der Fertigstellungsstatus häufig nur manuell geschätzt oder indirekt über die Zeiterfassungen der Mitarbeiter oder Anlieferungsprotokolle erfasst. Diese heterogenen Informationen sind häufig nicht prozessorientiert und können nicht direkt in die Simulation übernommen werden. Somit werden häufig nur Näherungswerte angenommen, die zu großen Abweichungen in der Simulation führen können.

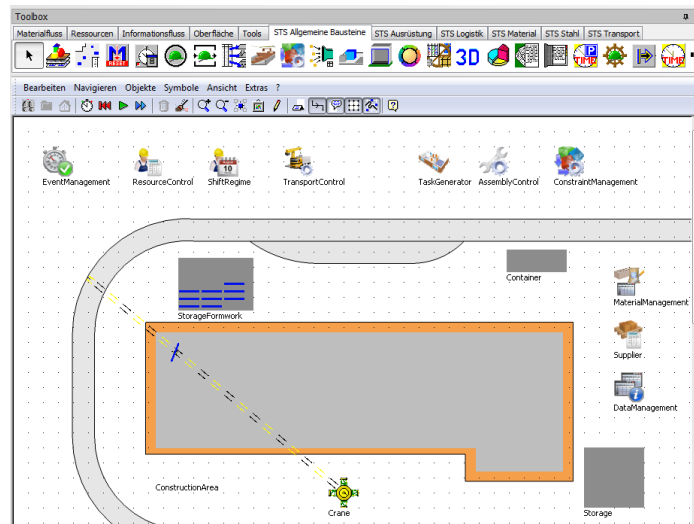
Obwohl die Unwägbarkeiten und Aufwände für eine Simulation von Unikatprozessen erheblich sind, können simulationsgestützte Analysen der Produktions- und Logistikprozesse die Sicherheit und Verbesserung der Planung deutlich steigern. Verschiedene Alternativen könnten durchgespielt und Auswirkungen von Störungen oder Änderungen transparenter gemacht werden. Im Folgenden werden daher erste Methoden zur Aufstellungen von Simulationsmodellen für Unikatprozesse und Konzepte zur Datenaufbereitung vorgestellt.

### 3 Konzepte zum Modellaufbau

Die einzelnen Produktionsprozesse und Produktionsbedingungen müssen bei der Unikatproduktion sehr flexibel beschrieben werden können. Im Rahmen der Kooperationsgemeinschaft SIMoFIT (Simulation of Outfitting in Shipbuilding and Civil Engineering) wurde daher ein Constraint-basierter Simulationsansatz entwickelt, um beliebige Montagebedingungen generisch zu definieren und in der Simulation zu berücksichtigen (KÖNIG u.a. 2007). Einige Konzepte wurden schon zuvor sehr erfolgreich im Rahmen des Simulationsbausteinkastens **Simulation Toolkit Shipbuilding** (STS) verwendet, welcher federführend durch die FSG im Rahmen der SimCoMar-Kooperation (Simulation Cooperation in the Maritime Industries) entstanden ist (STEINHAUER 2006). Die zentrale Idee dabei ist, dass nicht feste Produktionsprozesse, beispielsweise in Form eines Netzplans definiert werden, sondern einzelne Prozessschritte. Für jeden Prozessschritt werden verschiedene Restriktionen (Constraints) definiert. Typische Constraints sind technologische Abfolgen, notwendige Ressourcentypen, die Verfügbarkeit von Material und Transportmitteln, aktuelle Ist-Termine oder auch bestimmte Bau- bzw. Fertigungs-

räume. Mit Hilfe der Simulation werden die einzelnen Prozesselemente in eine bestimmte Reihenfolge gebracht, die sich aus der Erfüllung der Constraints ergeben. Wiederkehrende Prozesselemente werden mit Hilfe von Prozessmustern einmalig für bestimmte Teilverfahren beschrieben. In welcher Reihenfolge diese abgearbeitet werden, wird ausschließlich über die Constraints gesteuert. Somit werden keine starren Fertigungslinien aufgebaut, sondern die Prozessschritte und Constraints können zu jeder Zeit ergänzt und geändert werden. Dies ist besonders zweckmäßig, wenn erst im Laufe der Planung konkrete Details über das Produkt verfügbar werden. Im Folgenden werden einige Simulationskomponenten des STS zur Aufstellung eines Modells für die Simulation von Unikatprozessen beschrieben.

Mit Hilfe des **Auftragsgenerators** werden die einzelnen Prozesselemente auf Basis der aufbereiteten Produktdaten erzeugt und an die Montagesteuerung übergeben. Die **Montagesteuerung** ist für das Ausführen der Prozesselemente zuständig. Zuerst werden alle Constraints der noch nicht ausgeführten Prozesse mit Hilfe des **ConstraintManagers** geprüft. Kann ein bestimmter Prozess gestartet werden, werden das entsprechende Material und die Ressourcen angefordert und gegebenenfalls zum entsprechenden Einbauort transportiert. Die angelieferten Materialelemente sowie deren aktueller Standort werden mit der **Materialverwaltung** organisiert. Die **Transportsteuerung** übernimmt die Auswahl von Transportmitteln und Transportwegen aufgrund entsprechender Transportanforderungen. Für bestimmte Transporte sind spezielle Transportmittel, z.B. Kräne, notwendig. Diese Elemente werden für ein bestimmtes Unikatprojekt spezifisch gesetzt. Des Weiteren existieren verschiedene Bauplätze, auf denen die entsprechenden Arbeiten ausgeführt werden müssen und die mit dem Baustein **Fläche** modelliert werden. Auch für die Lagerflächen werden damit projektspezifische Elemente definiert. Ein typisches Simulationsmodell zur Simulation von Rohbauarbeiten eines Gebäudes unter Verwendung der zuvor beschriebenen Elemente wird in Abbildung 1 dar gestellt.



**Abbildung 1:** Simulationsmodell für Unikatprozesse auf Basis des STS-Baustein-kastens

Die einzelnen Prozesselemente ergeben sich aus den herzustellenden Bauelementen oder Bauwerken unter Berücksichtigung der entsprechenden Produktionsmethode bzw. des Bauverfahrens. Die geometrischen Informationen über die einzelnen Montage- bzw. Produktionsorte, die im Laufe der Simulation variieren, können im Idealfall automatisch aus den geometrischen Informationen des aufbereiteten Produktmodells ermittelt werden.

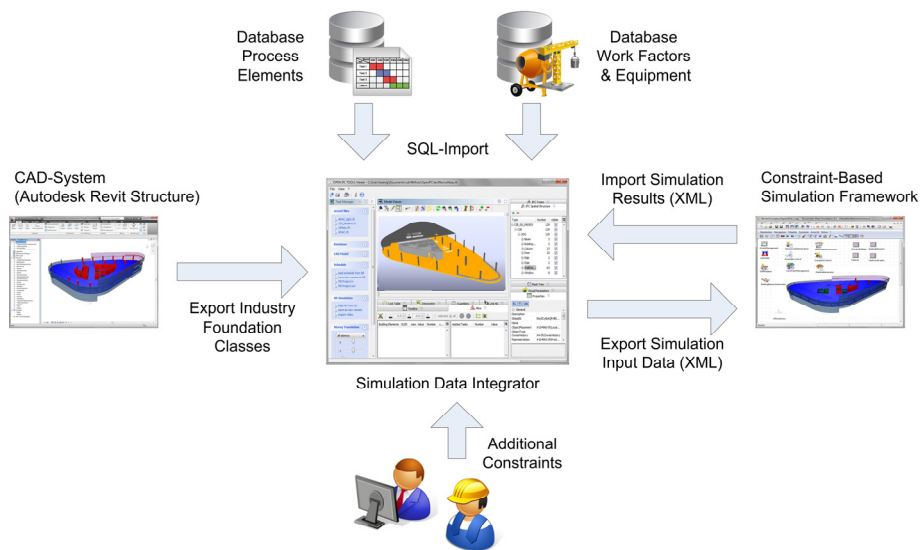
Eine große Herausforderung bei der Aufstellung eines solchen Modells ist die Definition der projektspezifischen Restriktionen. Hierzu gehören beispielsweise generelle Produktionsreihenfolgen oder Logistikketten. Ein Teil der Constraints kann aus den vorhandenen Produktdaten entnommen werden. Es existieren jedoch auch Restriktionen, die manuell ergänzt werden müssen. Hierzu sind entsprechende visuelle Eingabemöglichkeiten vorzusehen. Zum Beispiel werden Bauplätze, Lagerflächen, Transportwege mit den sprechenden Transportketten (z.B. kombinierte LKW-Kran-Transporte) oder auch generelle Produktionsreihenfolgen zwischen bestimmten Bauelementen bzw. Bauwerken interaktiv definiert. Durch die automatische Generierung der Prozesselemente auf Basis von Prozessmustern und entsprechenden Constraints kann jedoch der Aufwand erheblich reduziert werden. Für bestimmte Produktionsverfahren wurden spezielle Constraint-Generatoren abhängig von den verfügbaren Daten eines Produktmodells entwickelt. Beispielsweise existieren Generatoren für technologische Constraints für den Betonrohbau und Trockenbau im Hochbau oder für die Stahlbauprozesse im Schiffbau. Für den letzten Fall wurden bei der FSG Methoden entwickelt und in einem Softwarewerkzeug umgesetzt, welche aus der geometrischen Anordnung der zu montierenden Elemente in der aktuellen Baulage des Bauwerks, den Eigenschaften der Elemente und den zu berücksichtigenden Restriktionen des entsprechenden Bauortes automatisch die Montagebedingungen ermitteln.

#### **4 Daten für die Simulation von Unikatprozessen**

Die notwendigen Eingangsdaten müssen zielgerichtet aus vorhandenen Konstruktionsdaten bzw. ähnlichen Projekten übernommen werden können. Im Bereich des Schiffbaus wird zurzeit im Vorhaben GeneSim (Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit dem Förderkennzeichen 03SX274) in einem Konsortium um drei Werften ein generisches Datenmodell für die Simulation von schiffbaulichen Produktionsabläufen entwickelt (STEINHAUER 2010). Die Schiffsausrüstung als Unikatprozess spielt dabei eine wesentliche Rolle. Neben der Definition einer universellen Struktur für die simulationsrelevanten Daten im Schiffbau besteht eine wesentliche Aufgabe im Vorhaben GeneSim in der Entwicklung von Datengeneratoren für frühe Projektphasen, in denen das Produkt noch nicht im Detail beschrieben ist. Basierend auf Vergangenheitsdaten ähnlicher Schiffe bzw. auf Kennzahlen und Schätzungen sollen Daten für die Simulation erzeugt werden können, um die Simulation auch in frühen Projektphasen zur Verbesserung der Planung heranziehen zu können. Diese generierten Daten werden im Verlauf der Produktdefinition durch die realen Konstruktionsdaten ersetzt. Somit können die Auswirkungen des Konstruktionsfortschritts auf den geplanten Produktionsablauf mitlaufend bewertet werden.

Im Bauwesen werden durch die Ruhr-Universität Bochum innovative Konzepte zur automatischen Übernahme von Produkt- und Prozessinformationen entwickelt. Hierbei spielen wiederverwendbare Prozessmuster sowie formalisiertes Wissen zur Aufstellung von technologischen als auch geometrischen Randbedingungen eine entscheidende Rolle. Ein großer Teil der Simulationsdaten, wie Bauabschnitte, Bauelemente und die eigentliche Gebäudegeometrie werden aus einem standardisierten objektorientierten Bauwerksmodell abgeleitet. Das Bauwerksmodell ist im Industry Foundation Classes (IFC) Format beschrieben, welches direkt aus den gängigen CAD-Systemen für das Bauwesen exportiert werden kann. Für die einzelnen Bauelemente und Bauabschnitte werden bestimmte Bauverfahren anhand vorgegebener Typen (wie z.B. IFCWall, IFCColumn, etc.) schon bei der Konstruktion ergänzt.

Für jedes Bauverfahren sind in einer Datenbank bestimmte konfigurierbare Prozessmuster in Form von einzelnen Prozesselementen bzw. Vorgängen mit projektunabhängigen Constraints abgelegt. Die Vorgänge werden in einem nächsten Schritt um weitere Informationen ergänzt. Hierzu gehören unternehmensspezifische Aufwandswerte und notwendige Ressourcen. Diese Informationen werden im Rahmen eines Systems zur Verwaltung und Aufbereitung von Simulationsdaten manuell eingegeben oder auf Basis anderer Systeme interaktiv zugeordnet. Die Materiallisten werden auch aus bestehenden Systemen oder direkt aus den Bauteillisten des CAD-Systems übernommen und durch entsprechende Lieferzeiten ergänzt. Diese Informationen werden in dem System zur Datenaufbereitung zentral gehalten. In Zukunft soll dieses System auch zur Aufstellung von projektspezifischen Reihenfolgen erweitert werden. In Abbildung 2 sind das Zusammenspiel der einzelnen Datenquellen sowie die einzelnen Schritte der Datenaufbereitung schematisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Datenmanagement für die Simulation von Bauprozessen

## 5 Fazit und Ausblick

Die Simulation der Produktion von komplexen Unikaten wird heutzutage in der Praxis wenig angewendet. Wesentliche Hindernisse dabei sind, der erhebliche Aufwand bei der Erstellung von Simulationsmodellen mit den aktuell verfügbaren Simulationsumgebungen sowie die schlechte Verfügbarkeit der erforderlichen Simulationseingangsdaten. Im Rahmen dieses Beitrags wurden erste Konzepte aus dem Schiffbau und Bauwesen vorgestellt, um den Aufwand beim Einsatz von Simulation für Unikatprozesse zu reduzieren. Es wurden spezielle Softwarekomponenten für Simulation von Unikatprozessen auf Basis eines Constraint-basierten Ansatzes entwickelt. Im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten werden innovative Konzept zur Zusammenstellung und Aufbereitung von Daten für die Simulation auf Basis von Produktdaten entwickelt. Im Bereich der Simulation von Unikatprozessen ist noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu vollbringen. Insbesondere die Prüfung der Vollständigkeit der Simulationsdaten, die Korrektheit der definierten Constraints und deren intuitive Spezifikationen sowie die Automation des Informationsflusses zwischen den Konstruktions-, Planungs- und Simulationssystemen sind Aspekte zukünftiger Forschungsarbeiten.

## Literatur

- CHAHROUR, R.: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Kassel: Universität Kassel, Institut für Bauwirtschaft, Dissertation, 2006.
- KÖNIG, M.; BEISSERT, U.; STEINHAUER, D.; BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes In: Shipbuilding and Civil Engineering. Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation. Ljubljana, 2007, CD-ROM.
- MARX, A.; ERLEMANN, K.; KÖNIG, M.: Simulation of Construction Processes considering Spatial Constraints of Crane Operations. In: Proceedings of the 13th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE-XIII). Nottingham, 2010, CD-ROM.
- RUWANPURA, J. Y.; ABOURIZK, S. M.; ER, K. C.; FERNANDO, S.: Special purpose simulation templates for tunnel construction operations. In: Canadian Journal of Civil Engineering, Ottawa, 28(2001)2, S. 222-237.
- STEINHAUER, D.: Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft. In: Simulation in Produktion und Logistik 2006; Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung. Hrsg.: WENZEL, Sigrid. Erlangen: SCS Publishing House, 2006, S. 1-14.
- STEINHAUER, D.: GeneSim – Development of a Generic Data Model for Production Simulation in Shipbuilding. In: Proceeding of 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '10). Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2010. (ISBN 978-3-89220-649-1, S. 304-310)