

Simulationen zur Prüfung von Montage- und Logistikabläufen

*Sven Spieckermann, Ilka Habenicht, Georg Zeller & Jens Zimmermann
Simplan AG*

Kurzfassung: *Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Bausteinbibliothek für die Simulation von Montage- und Logistikprozessen im Bauwesen im Rahmen des Mefisto-Projektes. Es wird der aktuelle Stand der Simulation in den Bereichen Produktion und Logistik allgemein und insbesondere im Bauwesen diskutiert. In diesem Zusammenhang werden grundlegende Aufgabenstellungen und Ansätze der Simulation im Bauwesen skizziert. Die größten Herausforderungen an die Simulation in diesem Bereich sind die Verringerung des Modellierungsaufwandes und die Bereitstellung von Werkzeugen zur Modellierung unterschiedlicher Prozesstypen. Daraus lassen sich verschiedene Anforderungen an die Simulationsumgebung und an eine Bausteinbibliothek zur Modellierung der Montage- und Logistikprozesse ableiten. Die Bausteinbibliothek wird dabei auf Grundlage eines Bausteinkastens für die Simulation im Schiffbau (STS-Bausteinkasten) entwickelt. Es werden die erforderlichen Erweiterungen und der Stand der Entwicklungsarbeiten vorgestellt.*

1 Einleitung

Die Simulation ist eine anerkannte und in vielen Industriezweigen etablierte Methode zur Untersuchung von Produktions- und Logistikprozessen (vgl. Wenzel 2009). Im Bauwesen hat die Simulation diesen Status noch nicht erreicht. Simulation wird im Bauwesen bei großen Bauprojekten bislang eher selten eingesetzt (vgl. Wagner

und Scherer 2008). Die Ursachen liegen vor allem in der Individualität der Bauwerke und dem damit verbundenen Unikatcharakter sowohl des Produkts als auch großer Teile des Herstellprozesses. Aus diesem Grund ist die Simulation im Bauwesen immer noch mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden (vgl. Kugler und Franz 2008). Allerdings zeigt sich immer wieder, dass alleine durch eine statische Planung, wie sie zurzeit durchgeführt wird, in vielen Fällen die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Prozessen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden können (vgl. ForBAU 2008).

Mit Hilfe der Simulation können dynamische Zusammenhänge einzelner Prozesse in Bauprojekten untersucht werden. Simulation kann im Bereich der Planung, aber auch der Steuerung der Abläufe auf der Baustelle genutzt werden. Auch im Bauwesen wird die Simulation entsprechend ihrer Definition in der VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1, S. 2, eingesetzt: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Die größte Herausforderung bei der Simulation von Bauprozessen besteht in der Modellierung der Arbeitsschritte des jeweiligen Bauprojektes inklusive der Abhängigkeiten der Schritte. Ziel der Arbeiten im Rahmen des Mefisto-Projektes ist deshalb die Erstellung einer Bausteinbibliothek und die Bereitstellung der erforderlichen Datenstrukturen zur Modellierung der Bauprozesse und ihrer Abhängigkeiten. Die Arbeiten bauen auf dem STS-Simulationsbausteinkasten der Flensburger Schiffbaugesellschaft auf (vgl. Steinhauer 2006).

Auf Basis der Mefisto-Arbeiten werden in diesem Artikel die grundlegenden Anforderungen an eine Bausteinbibliothek für die Simulation im Bauwesen zusammengestellt. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die Einsatzmöglichkeiten der Simulation anhand zweier grundlegender Anwendungsbeispiele untersucht und weiterentwickelt. Das erste Beispiel ist eine Aufgabenstellung aus dem Bereich der Baustellen-Logistiksimulation. Der Schwerpunkt des zweiten Beispiels liegt demgegenüber in der Simulation der Montageprozesse. Die Erläuterung der Beispiele ist Gegenstand von Kapitel 6 dieses Beitrags.

Der übrige Aufbau des Beitrags ist wie folgt: Im nächsten Kapitel wird ein Überblick über den Stand der Technik und die grundlegenden Entwicklungen der Simulation in Produktion und Logistik gegeben. Anschließend werden die Aufgabenstellungen an die Simulation im Bauwesen im Allgemeinen und im Mefisto-Projekt im Speziellen beschrieben. Der Artikel schließt mit einer Beschreibung der Beispiele und einer kurzen Zusammenfassung.

2 Entwicklungen der Simulation in Produktion und Logistik

Die Simulation hat sich in den letzten Jahren im Bereich der Produktion und Logistik als ein wichtiges Instrument etabliert. Sie findet in allen Phasen der Planung und Realisierung der Produktions- und Logistikprozesse Anwendung (vgl. Böhnlein 2004, Wenzel 2009). Diese Entwicklung zeigt sich auch in der großen Anzahl der

Simulationswerkzeuge, die sich zurzeit am Markt befindet. Eine umfassende Übersicht der Werkzeuge ist in Wenzel (2009) aufgeführt.

Aktuell lassen sich im Bereich der Simulation in Produktion und Logistik drei grundlegende Trends identifizieren (vgl. Wenzel et al. 2010):

- Weiterentwicklungen im Rahmen der Digitalen Fabrik,
- Verbesserung der Qualität der Simulationsstudien,
- Entwicklung von Anwendungssystemen zur Unterstützung verschiedener Simulationsaufgaben.

Der Grundgedanke der Digitalen Fabrik ist die Bereitstellung eines Netzwerks digitaler Modelle für alle Bereiche einer realen Fabrik, wobei mit der Digitalen Fabrik das Ziel einer durchgehenden Datenintegration verbunden ist (vgl. VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1). Die Simulation ist dabei ein Bestandteil in einem ganzen Netzwerk digitaler Modelle. In diesen Rahmen ordnen sich beispielsweise die Arbeiten zur automatischen Modellgenerierung aus CAD-Daten bzw. Arbeitsplänen ein (vgl. Lorenz und Schulze 1995 bzw. Lange et al. 2008). Auf diese Weise kann der Modellierungsaufwand reduziert werden. Ein weiterer Aspekt ist die Visualisierung, die insbesondere durch die Entwicklungen in der Computertechnik kontinuierlich mehr Möglichkeiten bietet. Die Visualisierung unterstützt unter anderem die Validierung der Modelle und die Auswertung der Simulationsergebnisse. Darüber hinaus hat sie einen wichtigen Stellenwert für die Präsentation und das Training. In diesem Kontext gewinnt die 3D-Visualisierung an Bedeutung, auch wenn sie nicht für alle Aufgaben die geeignete Darstellungsform ist (vgl. Wenzel 2009).

Mit der zunehmenden Verbreitung der Anwendung von Simulation in den Bereichen Produktion und Logistik gewinnt die Qualität der erzeugten Ergebnisse und der durchgeführten Simulationsstudien an Bedeutung. Im Mittelpunkt vieler Arbeiten steht die Absicherung der Simulationsergebnisse, die als Grundlage von Planungs- und Steuerungsentscheidungen dienen. Ein wichtiges Hilfsmittel dabei sind Vorgehensmodelle für die Durchführung von Simulationsstudien, wie sie etwa von der ASIM (Arbeitsgemeinschaft für Simulation in der Gesellschaft für Informatik) erarbeitet wurden (vgl. Abbildung 1).

Wenzel et al. (2008) definieren in diesem Zusammenhang Qualitätskriterien zur Bewertung von Simulationsstudien und weisen auf die besondere Bedeutung der Gültigkeit von Simulationsmodellen für eine gegebene Aufgabenstellung hin. Rabe et al. (2008) diskutieren Methoden der Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen. In dieser Arbeit wird insbesondere gezeigt, dass die Verifikation und Validierung in allen Phasen eines Simulationsprojektes von großer Bedeutung ist.

Im Zusammenhang mit einer effizienten Abwicklung von Simulationsprojekten und mit der Verbesserung der Qualität von Simulationsstudien ist auch die dritte Entwicklungsrichtung, die Entwicklung unterstützender Anwendungssysteme, zu sehen. Typischerweise nehmen in Simulationsstudien die Bereitstellung von Eingangsdaten, die Definition von Szenarien und die Auswertung der Simulationsergebnisse viel Raum ein. So befasst sich unter anderem das Forschungsprojekt

AssistSim mit der Entwicklung von Anwendungen zur Definition faktorieller Experimente und zur Durchführung von Simulationsexperimenten (vgl. AssistSim 2009).

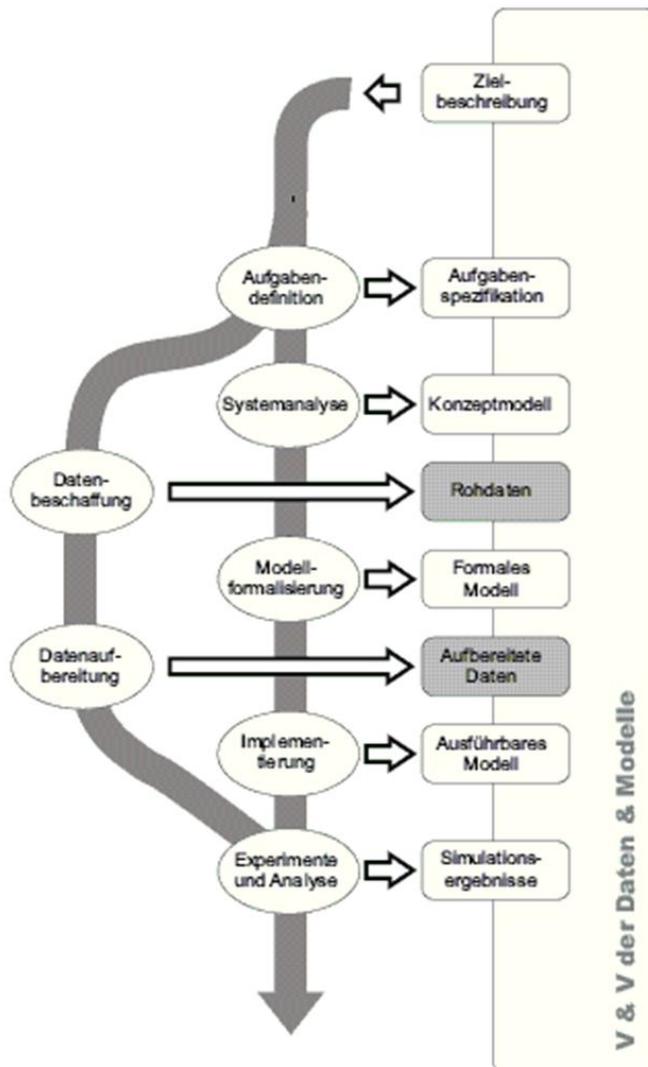


Abbildung 1: Vorgehensmodell bei der Simulation (nach Rabe et al. 2008)

3 Simulation im Bauwesen – Problemstellung und Ansätze

Die Prozesse in der Bauindustrie weisen gegenüber der stationären Industrie einige Besonderheiten auf, die den Einsatz der vorhandenen Simulationswerkzeuge erschweren (vgl. Ailland und Bargstädt 2008, Kugler und Franz 2008, Voigtmann und Bargstädt 2008):

- Unikatcharakter der Bauwerke,
- hoher Termin- und Kostendruck bei der Planung und Durchführung der Bauprojekte,
- Einsatz vielfältiger Ressourcen, die ortsgebunden oder mobil sein können,
- viele Produktionsstätten, die sich mit dem Bauprozess ändern,
- starke Verzahnung von Logistik- und Montageprozessen, teilweise durch Nutzung gleicher Ressourcen,

- großer Anteil manueller Tätigkeiten,
- große Störungsanteile aufgrund logistischer Randbedingungen bzw. durch Umwelteinflüsse.

Wenn heute Simulation in Bauprojekten eingesetzt wird, dann vor allem in der Planungsphase (vgl. Ailland und Bargstädt 2008). Diese untergliedert sich in verschiedene Stufen mit zunehmendem Detaillierungsgrad. Die grobe Terminplanung in der Angebotsphase basiert auf Volumenströmen und Zeitabschätzungen für die einzelnen Fertigungsabschnitte. Typische Simulationsaufgaben in der Grobplanung sind:

- Generierung bzw. Validierung der Terminplanung auf Basis der Volumenströme,
- Überprüfung des Logistikkonzeptes und Identifizierung möglicher Engpässe.

Bei der detaillierten Terminplanung werden auf Basis des Grobterminplans tagesgenaue Ablaufpläne generiert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass zwischen den verschiedenen Arbeitsschritten Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen bestehen, die sich aufgrund der Geometrie des Bauwerks bzw. aufgrund technologischer Restriktionen ergeben (vgl. Beißert et al. 2008). Außerdem werden in der Regel für die einzelnen Arbeitsschritte mehrere Ressourcen bzw. Arbeitskräfte angefordert.

Diese Abhängigkeiten können durch den Einsatz von Simulation bei der detaillierten Terminplanung bereits berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang lassen sich folgende Fragestellungen durch den Einsatz der Simulation beantworten:

- Bestimmung (tages-)genauer Arbeitsabschnitte,
- Überprüfung alternativer Reihenfolgen für die einzelnen Arbeitsschritte,
- Überprüfung alternativer Ausführungskonzepte mit unterschiedlichem Ressourcenbedarf,
- Ermittlung der Anzahl der erforderlichen Ressourcen bzw. des notwendigen Personals,
- Identifikation von Engpässen.

Eine besondere Herausforderung stellt die Betrachtung der logistischen Prozesse dar. Die Planung der logistischen Tätigkeiten ist eng mit der Planung der Arbeitsschritte verzahnt, da auf einer Baustelle nur begrenzte Lagermöglichkeiten zur Verfügung stehen. Die Position und die Größe der verfügbaren Lagerflächen verändern sich außerdem dynamisch im Baufortschritt. Die Simulation der Logistikprozesse ist mit folgenden Fragestellungen verbunden:

- Überprüfung alternativer Logistikkonzepte unter Berücksichtigung des dynamischen Umfelds,
- Ermittlung von Engpässen (Zufahrten, Kreuzungen, Lagerflächen),
- Bestimmung der Auswirkung von Störungen in der Baustellen-Logistik auf den Gesamtablauf des Bauprojektes (durch Kopplung mit der Simulation der Montageprozesse).

Neben der simulativen Unterstützung der Planungsprozesse kann die Simulation auch operativ eingesetzt werden. Ziel ist dabei die Einhaltung der vorgegebenen Termine bzw. die schnelle Reaktion auf Störungen im Ablauf. Ailland und Bargstädt

(2008) stellen einen Ansatz zum tagesgenauen Termincontrolling mit Hilfe der Simulation vor.

Für die Simulation im Bauwesen werden verschiedene Ansätze untersucht. Franz (1999) beschreibt einen Ansatz zur Simulation von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen. Die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Prozessschritten werden mit Hilfe der Petri-Netze modelliert. Die Flensburger Schiffbaugesellschaft hat für die Simulation der Montage- und Logistikprozesse im Schiffbau den STS-Simulationsbausteinkasten entwickelt. Dieser Bausteinkasten wurde in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar für die Anwendung auf das Bauwesen erweitert (vgl. Steinhauer 2006). Beißert et al. (2008) beschäftigen sich mit der Modellierung der Abhängigkeiten der Prozessschritte im STS-Simulationsbausteinkasten. Sie unterscheiden in ihrer Arbeit zwischen harten Restriktionen, die zwingend zwischen den einzelnen Arbeitsschritten gegeben sind, und weichen Restriktionen, die sich aufgrund gewählter Ablaufstrategien als zweckmäßig erweisen. Kugler und Franz (2008) stellen einen Ansatz für die agentenbasierte Simulation von Bauprozessen vor.

Die wichtigsten Entwicklungen der Simulation im Bauwesen lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Automatische Generierung von Simulationsmodellen,
- Visualisierung der Simulationsabläufe in 3D.

Hier gibt es gewisse Parallelen zu allgemeinen Entwicklungen der Simulation in Produktion und Logistik. Dies zeigt sich auch in den Schwerpunkten der Forschungsprojekte ForBAU und Mefisto, die sich mit Fragestellungen rund um eine sogenannte „Digitale Baustelle“ befassen (vgl. ForBAU 2008 und Scherer 2010).

Die Visualisierung der Simulationsergebnisse in 3D wird im Rahmen des Forschungsprojektes ForBAU untersucht (vgl. ForBAU 2008). Ansatz dieser Visualisierung ist eine Darstellung der Ergebnisse nach Durchführung der Simulation in einem 3D-Modell. Im STS-Simulationsbausteinkasten wurde ebenfalls eine Komponente zur Generierung von 3D-Modellen integriert. Diese wendet den 3D-Viewer von der Simulationssoftware Plant Simulation an (vgl. Steinhauer 2006).

4 Anforderungen an die Bausteinbibliothek zur Simulation der Montage- und Logistikprozesse

Im vorhergehenden Kapitel sind einige Merkmale der Bauindustrie aus dem Blickpunkt der Simulation sowie typische Aufgabenstellungen für die Simulation im Bauprozess zusammengestellt. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Anforderungen an Bausteine zur Simulation der Montage- und Logistikprozesse in der Bauindustrie diskutiert. Daraus werden anschließend ein Konzept für eine domänenspezifische Simulationsumgebung und eine grundlegende Bausteinstruktur abgeleitet. Aus den Bausteinen ergibt sich dann insgesamt eine wieder verwendbare Bausteinbibliothek zur Modellierung von Bauprozessen. Eine zentrale Anforderung ist, wie bereits erläutert, die effiziente Generierung von Modellen aus den Da-

ten des Bauprojektes. Dafür müssen generische Lösungen erarbeitet werden. Die automatische Generierung von Simulationsmodellen soll den aufwendigen Modellierungsprozess vereinfachen.

Gewisse Rahmenbedingungen für Simulationsbausteine ergeben sich aus den im Mefisto-Projekt definierten Fachmodellen. Für die Simulation relevant sind vor allem das Bauwerks-, das Baustellen- und das Vorgangsmodell. Im Bauwerksmodell werden die herzustellenden Bauwerkselemente mit ihren Attributen beschrieben und zugehörigen Bauwerksabschnitten zugeordnet. Im Vorgangsmodell wird die Herstellung der Bauwerkselemente im Detail beschrieben und der Herstellungsprozess in Arbeitsabschnitte eingeteilt. Das Baustellenmodell liefert schließlich die Informationen über die verfügbaren Ressourcen und gegebenen Randbedingungen. Aus diesen Fachmodellen können die für die Simulation notwendigen Informationen über geeignete Schnittstellen in das Simulationsmodell eingelesen werden.

Die erste Anforderung an Simulationsbausteine lässt sich aus den verschiedenen Aufgabenstellungen für die Simulation im Bauwesen ableiten. Diese Aufgabenstellungen erfordern einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad in der Modellierung der betrachteten Prozesse. Das bedeutet, dass mit Hilfe der Bausteinbibliothek Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad erstellt werden können müssen. Dieser Anspruch ist mit der Forderung nach einem möglichst allgemeingültigen Datenmodell für die Simulation und nach einer Bibliothek mit Bausteinen zur Modellierung unterschiedlicher Bauprozesse (Montage, Logistik) verbunden.

Mit Hilfe der Simulation sollen Montage- und Logistikprozesse untersucht werden können: Es werden einerseits Montageprozesse für die eigentliche Erstellung des Bauwerks und andererseits Logistikprozesse zur Modellierung der Bereitstellung der Materialien und Ressourcen für die Bauwerkserstellung betrachtet. In der Bausteinbibliothek müssen Funktionen zur Generierung und Steuerung der unterschiedlichen Prozesse zur Verfügung gestellt werden, wobei sich die Prozesse vor allem in der Ausführung und in der Generierung unterscheiden: Der Montageprozess wird auf Basis des Bauwerks- und des Vorgehensmodells definiert. Ein Montageschritt ist an einen bestimmten Arbeitsort gebunden. Zudem werden für die einzelnen Montageschritte Ressourcen, wie Kräne, Mitarbeiter oder Baugeräte, benötigt. Diese Ressourcen verfügen über unterschiedliche Eigenschaften. Der Detaillierungsgrad der Modellierung einer Ressource hängt von der Aufgabenstellung ab. Die Ressourcen und Materialien werden an diesem Montageort bereitgestellt und während der Prozesszeit gebunden. Nach Durchführung eines Montageauftrags werden die Ressourcen wieder freigegeben.

Für die Bereitstellung der Ressourcen und Materialien werden Logistikaufträge generiert. Ein Logistikauftrag wird durch Ressourcen, wie Fahrzeuge oder Kräne, durchgeführt und lässt sich in vier Grundschritte zerlegen:

1. Ressource fährt zum Standort des Materials.
2. Ressource lädt das Material.
3. Ressource fährt zum Zielort des Materials (Lager-/Übergabe-/Montageort).
4. Ressource entlädt das Material.

Nach Ausführung des letzten Schrittes kann die Ressource für den nächsten Auftrag freigegeben werden. Ganz ähnlich ist das Vorgehen auch bei der Übergabe der Materialien zwischen Ressourcen (z.B. von LKWs an Kräne) und bei der Bereitstellung von Ressourcen wie Schalungen an den Montageorten.

Eine Besonderheit im Bauwesen sind die räumlichen Gegebenheiten. So dürfen sich die Arbeitsbereiche für verschiedene Prozesse nicht überschneiden (z.B. beim Schwenken der Kräne). Außerdem ändern sich die Lager- und Bauplätze während des Bauprozesses dynamisch. Die Bausteinbibliothek muss somit Werkzeuge zur Reservierung und Freigabe der Räume auf der Baustelle zur Verfügung stellen. Einen Ansatz zur Simulation von Kränen mit überschneidenden Schwenkbereichen stellen Marx et al. (2010) vor.

5 Eine Bausteinbibliothek für das Bauwesen

5.1 Architektur der Simulationsumgebung

Wie bereits diskutiert, liegt in einer Vereinfachung (und idealerweise einer Automatisierung) der Abläufe rund um die Simulation ein wesentlicher Erfolgsfaktor für den verstärkten Einsatz dieser Technologie im Bauwesen. Eine zentrale Rolle im Mefisto-Projekt nimmt dementsprechend die automatische Generierung von Eingangsdaten für die Simulation aus den Daten des sogenannten Mefisto-Containers ein. Diese Generierung erfolgt nicht direkt in den Strukturen des Simulationsmodells. Die Daten werden vielmehr in einer Datenbank so aufbereitet, dass sie sich einfach in die Modellstrukturen übertragen lassen (Abbildung 2).

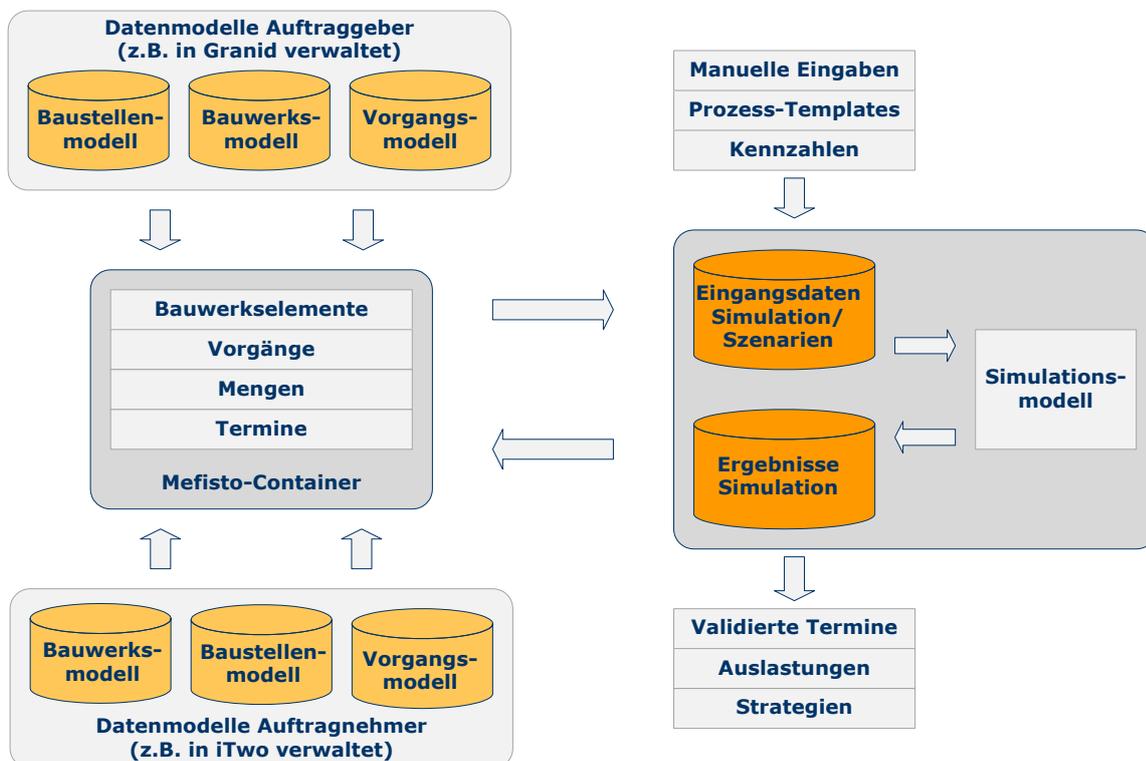


Abbildung 2: Simulationsumgebung und Mefisto-Container

Der Mefisto-Container wird im Rahmen des Mefisto-Projektes als Behälter für verschiedene Fachmodelle genutzt, die bei Bauprojekten auf Auftragsgeber- bzw. auf Auftragnehmerseite benötigt werden. Als Datengrundlage der Simulation dienen das Bauwerksmodell mit den einzelnen Bauwerkselementen und das Vorgangsmo-
dell. Aus diesen Elementen werden konkrete Montageaufträge mit Prozessschrittfolgen abgeleitet. Dazu werden Prozess-Templates (vordefinierte Teilprozessfolgen) für die einzelnen Bauelementtypen genutzt. Ein Prozess-Template für das Herstellen einer Wand besteht beispielsweise aus den Schritten: Innenschalung montieren, Bewehren, Außenschalung montieren, Betonieren, Aushärten und Ausschalen. Diese Prozess-Templates beinhalten Definitionen technologisch notwendiger Reihenfolgen auf Basis von sogenannten lokalen Bedingungen (Constraints). So darf beispielsweise bei der Montage der Wand der Prozessschritt erst beginnen, wenn der Vorgängerschritt abgeschlossen ist. Zusätzlich werden über globale Bedingungen die Reihenfolgebeziehungen zwischen den einzelnen Bauwerkselementen und den entsprechenden Prozessschritten definiert. Das Vorgehen basiert auf einem constraint-basierten Simulationskonzept, das Beißert et al. (2008) ursprünglich für die Simulation im Schiffsbau vorgestellt haben. Dieses Konzept lässt sich auf die Simulation im Bauwesen übertragen.

5.2 Bausteine der Bibliothek

Ein Ziel der Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Mefisto-Projektes ist die Erstellung einer Bausteinbibliothek unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen. Der STS-Simulationsbausteinkasten der Flensburger Schiffbaugesellschaft (vgl. Steinhauer 2006) stellt dafür bereits die grundlegenden Bausteine zur Verfügung. Aus diesem Grund werden die Bausteine dieser Bibliothek entsprechend den Anforderungen durch das Bauwesen erweitert.

Im Simulationsmodell werden verschiedene Aufträge betrachtet, die auf Basis der definierten Montage- bzw. Logistikprozesse generiert werden. Die grundlegenden Funktionen zur Abarbeitung der Montage- oder Logistikaufträge werden dabei durch das Zusammenspiel der Bausteine realisiert. Aus den Montageprozessen werden Aufträge generiert, die in einem Baustein „Assembly Control“ verwaltet werden. Abbildung gibt einen schematischen Überblick über das Zusammenspiel der Steuerungsbausteine zur Modellierung der Montage- und Logistikprozesse.

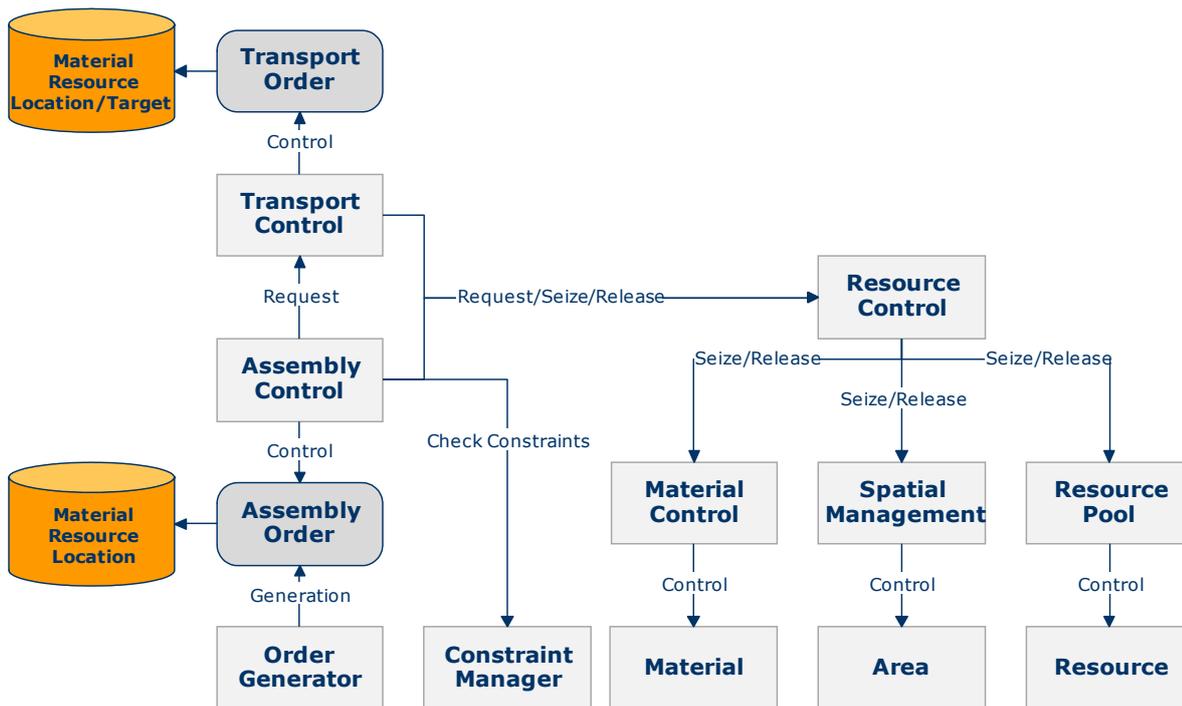


Abbildung 3: Interaktion der Bausteine des Bausteinkastens

Der Kernbaustein ist die „Assembly Control“, welche die einzelnen Aufträge verwaltet. Zum Starten eines Auftrags müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein:

- Alle Constraints, die sich aus Vorgänger-Beziehungen ergeben, müssen erfüllt sein. Dies wird über den Baustein „Constraint Manager“ abgefragt.
- Die erforderlichen Ressourcen müssen zur Ausführung des Auftrags verfügbar sein. Der Baustein „Resource Control“ verwaltet alle Ressourcen. Durch eine zentrale Verwaltung aller Ressourcen werden alle Informationen über den Status der Ressourcen und aller offenen Anfragen zentral verwaltet. Als Ressourcen werden neben den Mitarbeitern oder technischen Ressourcen auch Materialien und Arbeitsbereiche betrachtet.
 - Die Ressourcen werden nach Ressourcentyp getrennt in unterschiedlichen Ressourcenpools verwaltet. Die Ressourcenverwaltung stellt Anfragen nach verfügbaren Ressourcen an die jeweiligen Pools.
 - Alle Materialien müssen am vorgesehenen Ort zur Verfügung stehen. Die Materialien werden durch den Baustein „Material Control“ verwaltet.
 - Der Arbeitsbereich bzw. der Lagerbereich muss verfügbar sein. Dazu werden die Räume bzw. Flächen mit dem Baustein „Spatial Management“ verwaltet.
- Die Logistikaufträge werden auf Basis der Material- und Ressourcenanforderungen der Montageaufträge generiert. Die Logistikaufträge werden im Baustein „Transport Control“ verwaltet. Der Baustein arbeitet analog zum Baustein „Assembly Control“ mit den anderen Steuerungsbausteinen zusammen.

6 Anwendungsbeispiele

Im Rahmen des Mefisto-Projektes sind zwei Beispiele definiert worden, die sich in der Art der modellierten Prozesse und im jeweils erforderlichen Abstraktionsgrad grundlegend unterscheiden. Eine Einordnung der Beispiele hinsichtlich des Abstraktionsgrades und der zugrunde liegenden Informationen ist in Abbildung 4 gegeben. Die Modelle wurden in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum entwickelt.

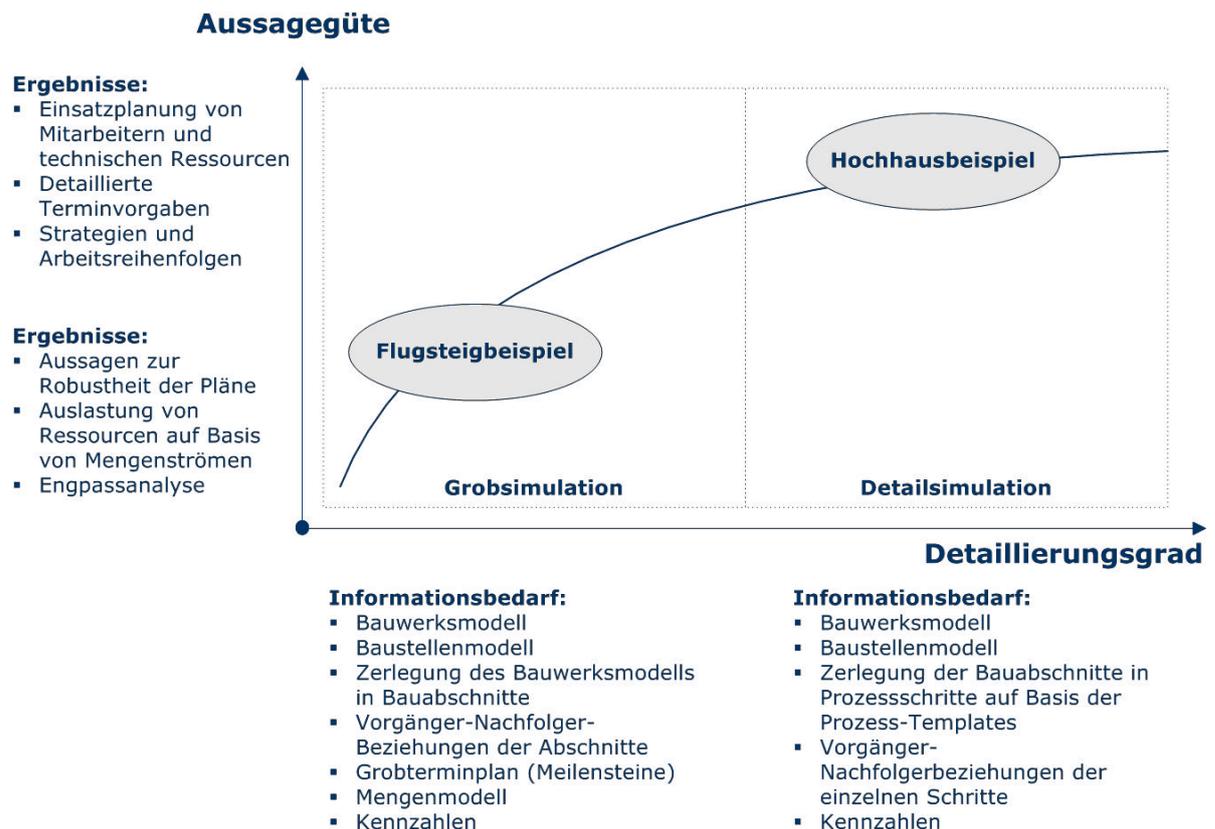


Abbildung 4: Detaillierungsgrad und Aussagegüte der Anwendungsbeispiele

6.1 Anwendungsbeispiel Logistiksimulation – Flugsteig

Das erste Anwendungsbeispiel setzt sich mit Aufgabenstellungen der Simulation im Rahmen der Grobplanung auseinander. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Baustellenlogistik, d.h. die An- und Ablieferungen von Materialien auf der Baustelle. Es soll simulativ untersucht werden, ob das Logistikkonzept der Baustelle zur Errichtung eines Flugsteigs für die geplanten Volumenströme durchführbar ist. In diesem Zusammenhang sollen die Einhaltung der Terminvorgaben, die Auslastung der Kräne und die Bestandsentwicklung auf den Lagerflächen bestimmt werden. Außerdem sollen eventuell auftretende Engpässe aufgezeigt werden.

Basis des Modells sind das Bauwerksmodell mit den Bauelementen und der Ausführungsterminplan für die einzelnen Bauabschnitte. Der Ausführungsterminplan gibt die Start- und Endtermine der einzelnen Bauleistungen vor und beschreibt ihre

Abhängigkeit untereinander (Vorgänger-Nachfolger-Beziehung). Die Bauleistungen werden in verschiedenen Bauabschnitten erbracht. Die Elemente des Bauwerks sind den einzelnen Bauabschnitten zugeordnet. Aus diesen Zuordnungen kann ermittelt werden, welches Material in welcher Menge in einem vorgegebenen Zeitraum an- bzw. abgeliefert werden muss. Diese Gesamtmengen werden wiederum in Transporteinheiten zerlegt. Es wird angenommen, dass die Ankunftszeitpunkte der Transporteinheiten in dem vorgesehenen Zeitraum stochastisch verteilt sind.

Das Baustellenmodell definiert die Standorte der Baustelleneinrichtung einschließlich der Kräne. Es sind die Lager, die Fahrstraßen und die Zu- bzw. Abfahrten vorgegeben. Die Transporte werden entsprechend den Vorgaben aus dem Logistikkonzept abgebildet. In diesem Konzept ist für jedes Material definiert, ob es bei Anlieferung auf der Baustelle zwischengelagert oder direkt an den Montageort transportiert werden muss. Im Fall einer Zwischenlagerung muss für die Materialien entsprechende Lagerfläche zur Verfügung stehen. Außerdem müssen die Ressourcen zum Entladen der anliefernden Fahrzeuge verfügbar sein. Ein Fahrzeug fährt somit erst auf die Baustelle, wenn diese Bedingungen erfüllt sind. Für die Transporte der Materialien von den Zwischenlagern zu den Ausführungsorten ist ebenfalls eindeutig definiert, welche Ressourcen genutzt werden. Die Transporte zu den eigentlichen Montageorten können erst erfolgen, wenn der entsprechende Montageschritt auch durchgeführt werden kann. Die Reihenfolge der einzelnen Montageschritte auf der Baustelle wird nicht nur durch die Vorgaben des Ausführungsterminplans definiert. Die Abhängigkeiten der einzelnen Bauabschnitte zueinander werden über Bedingungen (Constraints) definiert, basierend auf der technologisch bedingten Reihenfolge und des Gesamtkonzepts für die Baustelle.

In diesem Fallbeispiel werden die Montageprozesse nicht detailliert abgebildet. Sie spielen nur bei den Ressourcen eine Rolle, die sowohl bei Montage- als auch Logistikprozessen benötigt werden, wie beispielsweise den Kränen. Derartige Ressourcen werden für die Zeitdauer der Montagearbeiten gesperrt, sobald alle Materialien am Montageort bereitgestellt sind und die Montagearbeiten beginnen können.

6.2 Anwendungsbeispiel Montagesimulation – Hochhaus

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung werden aus dem Ausführungsterminplan detaillierte Arbeitsfolgen generiert. Es wird ein detaillierter Terminplan erstellt. Basis dieser Detaillierung sind technologisch vorgegebene Arbeitsreihenfolgen und die Auslastung kritischer Ressourcen (Werker, Kräne, Betonpumpen usw.). Ergebnis dieses Planungsschrittes ist ein Terminplan, in dem einzelnen Arbeitstagen Arbeitsschritte zugeordnet sind.

Das zweite Anwendungsbeispiel setzt sich mit dieser Aufgabenstellung aus der Arbeitsvorbereitung auseinander. Bei der statischen Berechnung der detaillierten Terminpläne kann das dynamische Zusammenspiel der einzelnen Ressourcen nicht berücksichtigt werden. Aufgabenstellung des zweiten Anwendungsbeispiels ist im ersten Schritt die Überprüfung eines statisch generierten Arbeitsplans mit Hilfe der Simulation. Grundlage ist der Terminplan der Arbeitsschritte für die Montage eines

Hochhausgeschosses. Die Betrachtung eines Geschosses ist in diesem Fall ausreichend, da sich die Arbeitsinhalte auf den einzelnen Geschossen nur geringfügig unterscheiden. Im Rahmen der Simulationsuntersuchung werden die Einhaltung der Terminvorgaben und die Auslastung der Ressourcen ermittelt. Ferner werden Empfehlungen für die Reihenfolge der Arbeitsschritte ermittelt, die um die gleichen Ressourcen konkurrieren. Die betrachteten Prozesse beziehen sich in diesem Beispiel auf die Einzelelemente des Bauwerksmodells und die damit verbundenen Prozessschritte.

Da ausschließlich Montageschritte betrachtet werden, wird angenommen, dass das notwendige Material zur Bauwerkserstellung vorliegt. Als Ressourcen sind Mitarbeiter mit unterschiedlichen Qualifikationen berücksichtigt. Die Dauer der Prozesse hängt von der Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter ab.

Die Kräne sind nur als abstrakte Ressourcen enthalten, d.h. sie werden für die Dauer der jeweiligen Arbeitsschritte belegt. Dabei kann definiert werden, welcher Kran für die Ausführung einzelner Arbeitsschritte eingesetzt werden darf. Diese Zuordnung erfolgt anhand des Baustellenmodells. In Abbildung 5 werden ein Auszug aus dem Simulationsmodell und eine Darstellung der in der Simulation errechneten Ressourcenbelegung in einem Gantt-Chart gezeigt.

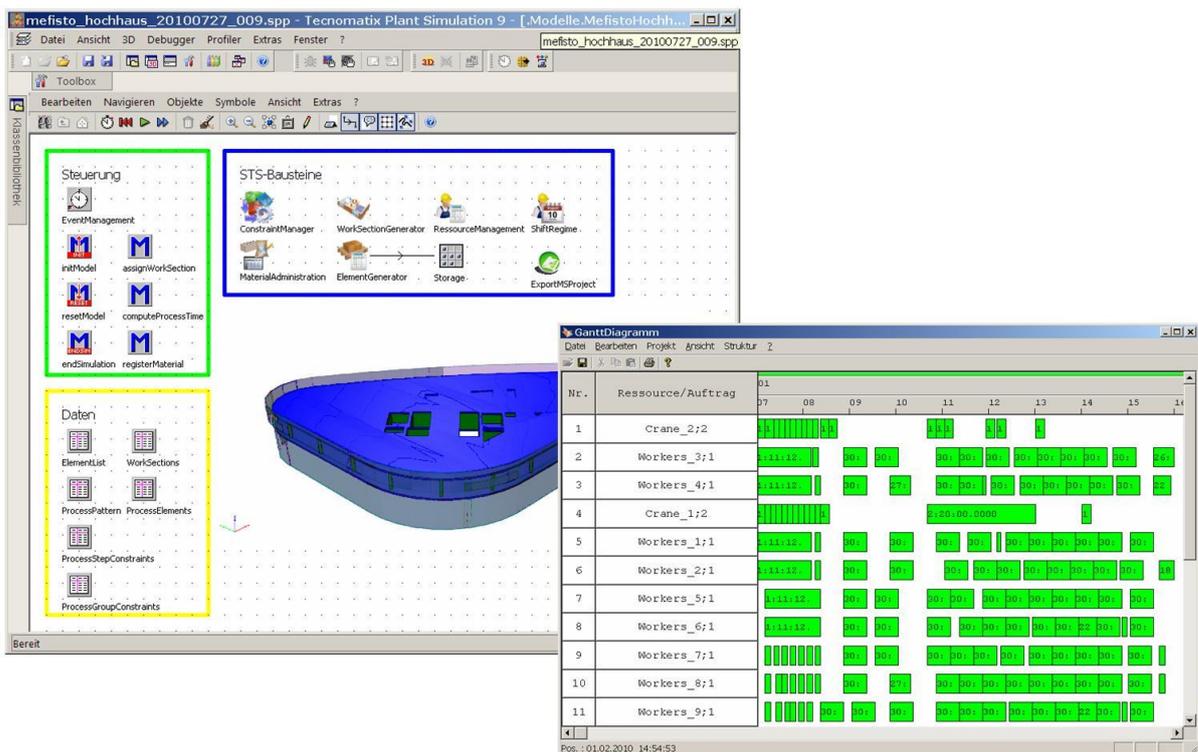


Abbildung 5: Simulationsmodell für das Hochhausbeispiel

In einem weiteren Schritt soll das Modell für eine simulationsbasierte Terminierung eingesetzt werden. Dabei wird auf Grundlage der globalen und lokalen Bedingungen ein gültiger Terminplan ermittelt. Die Vorgabe eines statischen Terminplans ist hierfür dann nicht mehr erforderlich. Außerdem soll eine weitere Detaillierung der

Modellierung der Kräne erfolgen, bei der die Kranbewegungen bzw. das Überschneiden der Schwenkbereiche berücksichtigt wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Ansätze für die Simulation der Logistik- und Montageprozesse im Bauwesen innerhalb des Mefisto-Projektes. Dabei zeigt der Artikel einleitend, dass die Simulation im Bauwesen im Vergleich zu anderen Bereichen, wie beispielsweise der (stationären) Produktion und Logistik vergleichsweise selten eingesetzt wird. Erfolgsfaktoren für den verstärkten Einsatz im Bauwesen sind (teil-) automatische Datenaufbereitung und Modellgenerierung sowie weitere Fortschritte bei der Visualisierung.

Im Rahmen des Mefisto-Projektes wird die Simulation als Instrument zur Unterstützung der verschiedenen Planungsschritte eines Bauprojektes weiterentwickelt. Aus den Aufgaben im Rahmen der Grob- bzw. Feinterminierung haben sich Anforderungen an eine Simulationsumgebung und einen Bausteinkasten ergeben. Es wird eine grundlegende Architektur einer Simulationsumgebung beschrieben. Ein zentrales Element dieser Architektur ist eine Datenbank, welche die erforderlichen Eingangsdaten der Simulation in aufbereiteten Strukturen zur Verfügung stellt.

Der Artikel beschreibt exemplarische Anwendungen der Simulation im Bauwesen anhand von zwei Beispielen, die sich mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen befassen. Das Simulationsbeispiel mit dem Fokus auf der Grobterminierung basiert stark auf dem STS-Simulationsbausteinkasten aus dem Schiffbau. Auf Basis der Vorgaben aus dem Grobterminplan und der kalkulierten Mengenströme werden die Daten für das Modell aufbereitet.

Im zweiten Simulationsbeispiel sind die Ressourcen, insbesondere die Kräne, abstrakt abgebildet. In weiteren Schritten wird durch eine Erweiterung der Simulationsbibliothek eine genauere Modellierung der Kranressourcen ermöglicht. Bei dem Bau einer Etage eines Hochhauses spielen die begrenzten Arbeitsräume eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund müssen in einem weiteren Arbeitsschritt die Arbeitsbereiche für die einzelnen Montageschritte und die Schwenkbereiche der Kräne in die Betrachtungen integriert werden.

Referenzen

Ailland K., Bargstädt H.-J. (2008): Tagesgenaues Termincontrolling auf Baustellen mit Hilfe der Simulation. In: Rabe, M. (Hrsg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 171-178.

AssistSim (2009): <http://assistsim.cs.uni-frankfurt.de/> (20.09.2010). Forschungsprojekt, HA-Projekt-Nr. 185, S.09-15.

Beißert U., König M., Bargstädt H.-J. (2008): Simulation von Ausführungsstrategien mit Hilfe von Soft Constraints und lokaler Suche. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 141-150.

Böhnlein C.-B. (2004): Simulation in der Betriebswirtschaft. In: Mertins, K., Rabe, M. (Hrsg.): Experiences from the Future – New Methods and Applications in Simulation for Production and Logistics. Tagungsband zur 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 1-22.

ForBAU (2008): Virtuelle Baustelle – Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung. Zwischenbericht, Bayrischer Forschungsverbund Virtuelle Baustelle.

Franz V. (1999): Simulation von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen. In: Hohmann, G. (Hrsg.): Frontiers in Simulation. Tagungsband zum 13. Symposium Simulationstechnik, SCS European Publishing House, Ghent.

Kugler M., Franz V. (2008): Einsatz von Simulation zur Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen im Bauwesen. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 151-160.

Lange J., Schmidt K., Rose O. (2008): Automated Generation and Parameterization of Throughput Models for Semiconductor Tools. In: Mason, S., Hill, R., Mönch, L., Rose, O., Jefferson, T., Fowler, J. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Miami, S. 2335-2340.

Lorenz P., Schulze T. (1995): Layout Based Model Generation. In: Alexopolus, C., Kang, K. (Hrsg.) Proceeding of the 1995 Winter Simulation Conference, ACM Press, New York, S. 728-735.

Marx A., Erlemann K., König M. (2010): Simulation of Construction Processes Considering Spatial Constraints of Crane Operations. <http://www.mefisto-bau.de/publications/> (20.09.2010).

Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer-Verlag, Berlin.

Scherer R. (2010): MEFISTO: Eine Modell-, Informations- und Wissensplattform für das Bauwesen. <http://www.mefisto-bau.de/publications/> (20.09.2010).

Steinhauer D. (2006): Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung, SCS Publishing House e.V., San Diego, S. 1-14.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2000): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen. VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck, Beuth, Berlin.

VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1 (2008): Digitale Fabrik, Grundlagen. VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck, Beuth, Berlin.

Voigtmann J. K., Bargstädt H.-J. (2008): Simulation von Baulogistikprozessen im Ausbau. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 131-140.

Wagner U., Scherer R. (2008): Konzeption eines Werkzeuges für schnell zu erstellende Simulationen von Baustellenabläufen. In: Rabe, M. (Hrsg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 161-168.

Weber J. (2007): *Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten*. Dissertation, Universität Dortmund.

Wenzel S., Weiß M., Collisi-Böhmer S., Pitsch H, Rose O. (2008): *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer-Verlag, Berlin.

Wenzel S. (2009): Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik – Stand und Perspektiven. In: Elst, G. (Hrsg.): *Tagungsband zum ASIM-Treffen STS/GMMS*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 7-16.

Wenzel S., Boyaci P., Jessen U. (2010): *Simulation in Production and Logistics: Trends, Solutions and Applications*. In: Dangelmaier, W., Blecken, A., Delius, R., Klöpfer, S. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 73-84.