

# Simulation als Bestandteil eines BIM-basierten Vorgehens zur Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau

Jana Stolipin<sup>1\*</sup>, Ulrich Jessen<sup>1</sup>, Jan Weber<sup>2</sup>, Sigrid Wenzel<sup>1</sup>, Markus König<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung, Universität Kassel, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel; \*[jana.stolipin@uni-kassel.de](mailto:jana.stolipin@uni-kassel.de).

<sup>2</sup>Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, Gebäude IC, 44780 Bochum.

**Kurzfassung.** Für die Konstruktions- und Montageplanung von Großanlagen hat sich eine digitale modellbasierte Arbeitsweise, auch als Building Information Modeling (BIM) bezeichnet, durchgesetzt. Dieser Beitrag stellt für diesen Anwendungskontext ein Vorgehensmodell zur integrierten Planung und Gestaltung von logistischen Prozessen auf einer Baustelle vor. Ausgehend von einem BIM-basierten digitalen Modell und mit Unterstützung einer fachspezifischen Ontologie und Beschreibungen von Standardprozessen wird die Planung der Baustellenlogistik durchgeführt und mittels Simulation überprüft. Anhand eines Beispielmodells werden die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells vorgestellt, das Planungsergebnis simulativ überprüft und die Ergebnisse abschließend diskutiert.

## Einleitung

Effiziente und wirtschaftliche Produktions- und Logistikprozesse sind für den Unternehmenserfolg essentiell [1]. Ihrer Planung und Gestaltung wird damit eine hohe Relevanz zugesprochen; die geforderte hohe Planungsqualität bei gleichzeitig hoher Planungssicherheit auch bei komplexen Systemen kann durch die Anwendung digitaler Planungsmethoden und -modelle erreicht werden [2]. Auch für die logistischen Prozesse auf einer Baustelle im Großanlagenbau ist eine zuverlässige Planung entscheidend, da nur auf diese Weise eine abgesicherte Terminierung aller Bauprozesse auf dem Baustellengelände und ein konfliktfreier Ablauf umgesetzt werden können.

Heute werden im Anlagenbau digitale Modelle insbesondere zur Entwurfsplanung eingesetzt, jedoch können diese nicht direkt zur Planung und Steuerung der Baustellenlogistik genutzt werden, da beispielsweise die logistikrelevanten Informationen einzelner Anlagekomponen-

ten fehlen oder die vorhandenen Informationen nicht einheitlich strukturiert und somit nicht automatisiert auswertbar sind. Erst wenn zu jedem Bauelement die logistikrelevanten Informationen (z. B. Transport-, Lager- und Montagehinweise) vorliegen, kann eine Planung der Logistikprozesse auf der Baustelle realisiert werden. Das digitale Logistikmodell kann dann analysiert und im Hinblick auf ausgewählte Zielgrößen (z. B. Lagerbelegung oder Ressourcenauslastung) überprüft und ggf. verbessert werden. Ein derartiges digitales Planungsmodell kann u. a. auch als Grundlage für die Steuerung der Baustellenlogistik eingesetzt werden und die Entscheidungen zur operativen Durchführung der Logistikprozesse auf der Baustelle unterstützen. Dazu müssen allerdings die aktuellen Baufortschrittsinformationen regelmäßig gepflegt werden [3].

Der Beitrag stellt ein BIM-basiertes Vorgehen zur digitalen Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau vor. Das Ziel dieses Vorgehens ist, ausführenden Unternehmen Hilfsmittel zur effizienten Organisation und zur Sicherstellung der Bauprozesse der Anlage vor Ort anzubieten; dabei wird zur Absicherung der BIM-basierten Planung die Simulation eingesetzt. In diesem Beitrag wird – ausgehend vom Stand der Forschung zur Baustellenplanung im ersten Abschnitt – im zweiten Abschnitt das BIM-basierte Vorgehen vorgestellt. Neben der Darstellung der einzelnen Elemente des Vorgehens wird auch die Rolle der Simulation zur Validierung der für eine Baustelle geplanten Logistikprozesse im Großanlagenbau erläutert. Der dritte Abschnitt konzentriert sich auf die Beschreibung der Umsetzung des Vorgehens anhand eines Anwendungsbeispiels mit besonderem Fokus auf die Validierung der dazugehörigen Planung mittels eines mit dem Simulationswerkzeug AnyLogic erstellten

Simulationsmodells. Nach der Darstellung der Simulationsergebnisse werden im abschließenden vierten Abschnitt weitere Einsatzmöglichkeiten der Simulation im Rahmen der Methodik diskutiert und potenzielle Forschungsfragen abgeleitet.

## 1 Baustellenlogistikplanung

Die Bauwirtschaft ist durch einen sehr hohen Kostendruck getrieben und gilt als eine eher konservative Branche [4]. Im Großanlagenbau (z. B. Kraftwerke und Chemieanlagen) ähneln die Rahmenbedingungen in vielen Aspekten denen des klassischen Baubetriebs (z. B. Hoch- und Tiefbau), jedoch mit dem Unterschied, dass die Montage in Bezug auf die Logistik eine zentrale Stellung einnimmt. Logistik und Montage im Großanlagenbau stellen ein komplexes und ineinander verzahntes System dar [5]. Die Baulogistik lässt sich in die drei Bereiche Versorgungs- oder Beschaffungslogistik, Baustellen- oder Produktionslogistik und Entsorgungslogistik unterteilen, wobei die Baustellenlogistik alle logistischen Aufgaben auf dem Baustellengelände umfasst [2]. Die Baustellenlogistik im Großanlagenbau hängt u. a. von der geplanten Anlage, der Lage des Bauplatzes und den verfügbaren Ressourcen ab und stellt einen Schlüsselfaktor für den Projekterfolg dar [6].

### 1.1 Praxis der Logistikplanung

Planung und Steuerung der Prozesse auf der Baustelle basieren vorwiegend auf dem Wissen der erfahrenen Mitarbeitenden [7]. Dies führt häufig zu nicht standardisiertem Planungsvorgehen und erschwert die Koordination der Kommunikation aller Projektbeteiligten [8]. Bei der Projektplanung im Bauwesen ist meist nur wenig Zeit für die Arbeitsvorbereitung vorgesehen, um die verschiedenen Möglichkeiten des Bauablaufs, die Ressourcenplanung und die Baustelleneinrichtung zu prüfen und zu bewerten [9]. Außerdem erschweren die heterogenen Strukturen und die Vielzahl kleiner Unternehmen in der Bauwirtschaft die systematische Logistikplanung auf Baustellen und gleichzeitig die detaillierte Vorbereitung und sinnvolle Umsetzung der Baustellenlogistik [10].

Zwar ist mittlerweile die digitale BIM-basierte Planung von Gebäuden und Großanlagen weit verbreitet, jedoch finden Aspekte der Baustellenlogistik kaum Berücksichtigung, obwohl bereits einige wichtige Informationen zur Planung und Steuerung der Baustellenlogistik in aktuellen digitalen Modellen vorhanden sind [11].

### 1.2 Stand der Forschung

In der Bauindustrie setzt sich zurzeit das Konzept der Digitalen Baustelle zur Planung immer stärker durch. Zu den Bestandteilen der Digitalen Baustelle gehören die dreidimensionale Bauwerksmodellierung, die Einbindung logistischer Prozesse, eine zentrale Datenverwaltung sowie die Animation und Simulation von Vorgängen auf der Baustelle [12]. So werden für die Konstruktions- und Montageplanung von Großanlagen digitale Methoden eingesetzt, um eine BIM-basierte Arbeitsweise zu realisieren. Informationen zu Bauwerken, Baumaterialien, Terminen und Kosten können über Kommunikationsplattformen im gesamten Bauprozess allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden [2].

Hierzu werden digitale 3-D Modelle nach dem BIM-Prinzip erstellt, die von Fachabteilungen im Rahmen von Planungsaufgaben eingesetzt werden können. Neben geometrischen Informationen der Anlage enthält ein BIM-Modell daher weitere Informationen wie Termine, Kosten oder auch Eigenschaften zu einzelnen Anlagenelementen [13]. Charakterisiert wird ein BIM-Modell durch die Anzahl der Informationstypen, die als Dimensionen des Modells bezeichnet werden. [14]. Die Erweiterung von dreidimensionalen CAD-Modellen mit der Projektterminplanung stellt einen Teil der sogenannten n-D-Modellierung dar. Die Grundidee ist die Erweiterbarkeit eines 3-D-Modells um weitere Dimensionen. Mittels 4-D BIM werden die Modelle um eine Zeitdimension in Form eines Terminplans erweitert, wodurch eine Koordination der Logistikprozesse mit der dynamisch sich verändernden Baustellenumgebung ermöglicht wird [15].

BIM-Modelle für die Baulogistik werden heute im Hoch-, Tief- und Tunnelbau eingesetzt. BIM-Modelle in der Bauwirtschaft werden in der Literatur für die Baustelleneinrichtungsplanung [16], Materialflusslogistik [17], Bauprojektplanung [6, 18] und Baustellensimulation [19] angewandt. Da die ereignisdiskrete Simulation zur methodischen Absicherung der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse eingesetzt wird [21], kann sie auch die Planung der Baustellenlogistik sinnvoll unterstützen.

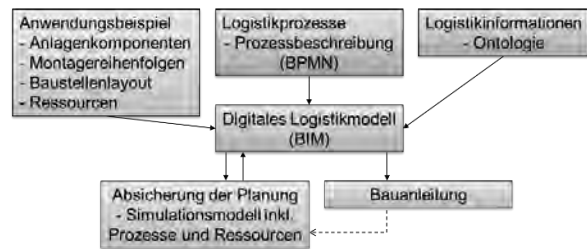
Für die Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau ist ein Vorgehen notwendig, das die spezifischen Eigenschaften der Baubranche berücksichtigt. Vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen Problematik wird in diesem Beitrag ein Vorgehen zur BIM-basierten Logistikplanung im Großanlagenbau und zu ihrer simulativen Absicherung vorgestellt.

## 2 BIM-basiertes Vorgehen zur Baustellenplanung

Bei der Planung der Baustellenlogistik müssen nicht nur der Ablauf des Bauprojekts, die Bauprozesse und die logistischen Aktivitäten, sondern auch die verfügbaren Ressourcen, die spezifischen Transport- und Lagerungsbedingungen für die Bauelemente sowie der Materialfluss und die Lagerkapazitäten auf der Baustelle berücksichtigt werden. Eine Herausforderung besteht darin, die BIM-basierten Modelle, um Logistikbeschreibungen zu erweitern und unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen in konkrete Logistikmodelle zu überführen.

Die Vorgehensweise umfasst neben der Formalisierung von produktindividuellen Logistikanforderungen auf Basis projektspezifischer Randbedingungen und Methoden zur semi-automatischen Generierung von Logistikmodellen für die Analyse und Planung der Baustellenlogistik auch Visualisierungs- und Adaptioniskonzepte zur Verwendung der digitalen Modelle auf der Baustelle. Das Zusammenwirken der einzelnen Bausteine der Vorgehensweise einer BIM-basierten Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Ausgehend von einem detaillierten BIM-Modell der Anlage (Anwendungsbeispiel) mit allen dazugehörigen Komponenten, zuvor definierten Montageprozessen und Montagereihenfolgen werden im ersten Schritt Anforderungen bezüglich Baustellenlogistik und der eigentlichen Durchführung der Montage mit entsprechenden Ressourcen über eine Ontologie verknüpft. Dabei werden auch das individuelle Baustellenlayout und die Ressourcen für das Anwendungsbeispiel berücksichtigt. Um auf Basis der Anforderungen und dazugehörigen Informationen eine semi-automatische Generierung eines Logistikmodells (inkl. Bauanleitung) zu realisieren, werden Methoden für die Erstellung des digitalen Modells mit logistikrelevanten Informationen vorgeschlagen.

Im nächsten Schritt werden die Gültigkeit des digitalen Logistikmodells und der auf seiner Basis erstellten Bauanleitung, die zusammen die Basis für die Logistikplanung repräsentieren, simulativ überprüft. Im Laufe des Projektfortschritts auf der Baustelle können die Randbedingungen oder Prozesse verändert werden, daher müssen die jeweils neuen Informationen ebenfalls bewertet werden. Hierzu werden diese in das bestehende Logistikmodell integriert und wiederum simulationsgestützt geprüft, um Probleme oder einen Anpassungsbedarf im Projektverlauf frühzeitig zu erkennen.



**Abbildung 1:** Zusammenwirken der Bausteine einer BIM-basierten Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau

Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile (erarbeitete Ontologie mit logistikrelevanten Informationen, allgemeingültig beschriebene Prozesse auf der Baustelle, Planungsszenarien, Bauanleitung und Simulation) sowie ihre Rolle im Rahmen des entwickelten Vorgehens kurz vorgestellt.

### 2.1 Rolle der Ontologie

Für die Realisierung der digitalen Baustellenlogistik im Großanlagenbau ist eine für die Vorgehensweise fachspezifische Ontologie entwickelt worden, um Informationen aus einem BIM-Modell, bestehend aus einer Anlage mit seinen Komponenten, Montageprozessen und Montagereihenfolgen, mit den Informationen der Baustellenlogistik sowie Informationen zur Durchführung der Montage mit den dazu notwendigen logistischen Ressourcen zu verknüpfen. Die Ontologie [22] beschreibt einerseits formal die semantischen Zusammenhänge zwischen den Anforderungen an die Baustellenlogistik sowie zwischen den Anforderungen an Montageprozesse, an den Projektgegenstand (z. B. Bauelemente einer Großanlage) und an weitere relevante Objekte auf der Baustelle (z. B. Lager, Anlieferungsfläche, Ressourcen usw.); sie enthält auch Montage- und Logistikinformationen für die Gestaltung der Abläufe auf der Baustelle in den Planungsszenarien. Andererseits wird die Ontologie als ein Informationsmodell verwendet, aus dem basierend auf einem detaillierten BIM-Modell einer Großanlage logistische Anforderungen abgeleitet und sogenannte Bauanleitungen generiert werden können.

### 2.2 Beschreibung der Logistikprozesse

Für die Unterstützung der Logistikplanung auf der Baustelle und ausgehend von den Anforderungen im Großanlagenbau werden Prozessabläufe für die Baustellenlogistikplanung mittels der Modellierungssprache BPMN

(Business Process Modeling Language) als Referenzprozesse dargestellt, mit denen die Beispielabläufe auf Baustellen (in den Planungsszenarios) abgebildet werden können. Die definierten BPMN-Referenzprozesse betreffen die Baustellenbereiche: Anlieferung, Baustellenlager, Zwischenlager, Montage und Entsorgungslager. Die einzelnen Referenzprozesse beinhalten logistikbezogene Tätigkeiten auf der Baustelle, wie das Transportieren, Lagern, Puffern, Entpacken, Umschlagen, Prüfen und Kommissionieren von Baumaterialien und -elementen. Auf Basis der dokumentierten BPMN-Referenzprozesse wird die Erstellung des digitalen Logistikmodells sowie des Simulationsmodells umgesetzt und somit eine detailliertere Planung von Prozessen auf der Baustelle ermöglicht.

### **2.3 Rolle des BIM-basierten Logistikmodells**

Das BIM-basierte Logistikmodell wird unter Verwendung eines konkreten BIM-Anwendungsbeispiels (inkl. Anlagekomponenten, Montagereihenfolgen, Baustellenlayout und geplanten Ressourcen) semi-automatisch erstellt. Das Logistikmodell beinhaltet neben den projektspezifischen Informationen und Geometriedaten der Anlage auch logistikrelevante Informationen aus der fachspezifischen Ontologie. In diesem Logistikmodell können nicht nur Termine für die einzelnen Bau- und Logistikprozesse gesichert werden, sondern es kann auch für die Erstellung einer Bauanleitung verwendet werden. Das Logistikmodell (inkl. Bauanleitung) stellt die Grundlage für die Erstellung von Planungsszenarien dar, die im Rahmen der BIM-basierten Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau simulativ abgesichert werden.

### **2.4 Rolle der Bauanleitung**

In 4-D BIM-Modellen ist zumeist nur eine grobe zeitliche Abfolge der einzelnen Bauabschnitte abgebildet, bei der beispielsweise alle Bauelemente eines Gewerks in einer Etage innerhalb einer festgelegten Woche eingebaut werden. Für eine genaue Planung der Logistikprozesse wird jedoch eine präzisere Zeitplanung benötigt. Da der Aufwand für die manuelle Erzeugung einer Schritt-für-Schritt-Bauplanung auf individueller Bauteilebene nicht wirtschaftlich ist, wird dieser Prozess automatisiert. Hierzu werden Regeln zur Montage der Bauelemente definiert. Diese Regeln beschreiben die Abhängigkeit der Bauelemente voneinander und ermöglichen – in Kombination mit Informationen über die Lage der Elemente relativ zueinander – die semi-automatische Generierung einer Schritt-für-Schritt-Bauanleitung. Mit dieser lässt sich

schließlich die genaue Abfolge der korrespondierenden Logistikprozesse festlegen. Durch die Betrachtung und Einreihung jedes einzelnen Bauelements wird so bei Bedarf eine Terminplanung für jedes einzelne Bauelement ermöglicht.

### **2.5 Erstellung der Planungsszenarien**

Auf Basis der definierten BPMN-Referenzprozesse, eines BIM-basierten Logistikmodells, einer Bauanleitung und dazugehörigen Informationen aus der Ontologie kann eine Planung der Prozesse auf der Baustelle durchgeführt werden. Hierzu werden Planungsszenarien definiert. Ein Planungsszenario enthält die terminliche Anordnung der Montage- und Logistikprozesse sowie Anlieferungen von Baumaterialien unter Berücksichtigung der für ein Anwendungsbeispiel geplanten Ressourcen und dessen Layouts. Dabei werden verschiedene Szenarien betrachtet und somit auch Zustände einer Baustelle definiert, sodass relevante Eigenschaften sowohl der Bau- und Logistikaktivitäten als auch der Bauelemente und -materialien des Bauprojekts berücksichtigt werden können. Beim Erstellen der Szenarien werden insbesondere die von der Bauanleitung vorgeschlagenen Reihenfolgen der Montage und die Zeitpunkte der Anlieferungen von Baumaterialien berücksichtigt und aufeinander abgestimmt. Zur Ausgestaltung der Prozesse auf der Baustelle werden die Informationen aus der Ontologie (z. B. Anforderungen der Baumaterialien für die Lagerung und den Transport auf der Baustelle) und die BPMN-Referenzprozesse verwendet. Die für ein Projekt geplanten Ressourcen, das Personal und das entsprechende Layout sowie die definierten Planungsszenarien werden dann mit Hilfe eines mit dem Simulationswerkzeug AnyLogic entwickelten Simulationsmodells hinsichtlich ihrer Gültigkeit überprüft.

### **2.6 Rolle der Simulation**

Zur Sicherstellung der Gültigkeit des Logistikmodells werden die im BIM-Modell aufgeführten Reihenfolgen, Restriktionen und verwendeten Ressourcen überprüft. Hierzu wird ein Materialflusssimulationsmodell auf Basis der Planungsdaten erstellt, das die in den Planungsszenarien definierten Prozesse (wie Reihenfolge der Montage, Transporte und Lagerungen) sowie Nutzung der verfügbaren Ressourcen (wie Lagerflächen und Transportmittel) modelliert und die ausgewählten Planungsszenarien experimentell untersucht. Nach der simulationsgestützten Überprüfung liegt ein konsistentes

und valides Logistikmodell vor, das auch zur Steuerung der Baustellenlogistik verwendet werden kann. Darüber hinaus liefert das Simulationsmodell bereits vor Beginn der eigentlichen Bautätigkeiten Leistungsdaten für eine mit entsprechender Materialfluss- und Lagertechnik vorgegebenen Ausstattung der Baustelle. Mit Hilfe der Simulation können somit die Anforderungen an die Dimensionierung der Lagerflächen auf der Baustelle überprüft und der Einsatz des Personals und der Ressourcen für die Realisierung des Bauprojekts quantifiziert werden. Außerdem wird es möglich, die auf der Baustelle geplanten logistischen Ressourcen über einen definierten Zeitraum zu überprüfen (u. a. Auslastung von Transportmitteln, z. B. von Kränen und Gabelstaplern, Belegung von Lagerflächen sowie Personaleinsatz).

Im Rahmen der BIM-basierten Planung der Baustellenlogistik wird das jeweils anwendungsspezifische Simulationsmodell zur Absicherung der Planung basierend auf den Daten der Referenzprozesse, Ontologie und BIM-Logistikmodelle standardisiert aufgebaut. Dieses Vorgehen ist auch als Basis für zukünftige Bauprojekte wiederzuverwenden.

### 3 Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung des BIM-basierten Vorgehens auszugsweise an einem Anwendungsbeispiel vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird zunächst das Anwendungsbeispiel vorgestellt und anschließend wird auf die Simulation zur Absicherung der durchgeführten Baustellenlogistikplanung eingegangen. Abschließend werden die Simulationsergebnisse diskutiert.

#### 3.1 BIM-Modell

Zur nachvollziehbaren Umsetzung wird ein einfaches BIM-Modell verwendet. Da Modelle aus der Praxis in der Regel sehr komplex sind, wird ein kleines Stahlbau-Modell (vgl. Abbildung 2) konstruiert. Dieses besteht aus zwei Lagerflächen und 78 Bauelementen, die trotz ihrer geringen Komplexität einem realen Stahlbau-Modell entsprechen. Die Konstruktion setzt sich aus einem Fundament und einer darauf befindlichen Stahlbaukonstruktion zusammen. Die Stahlbaukonstruktion besteht aus vier Stützen, fünf Trägern, darauf liegend zwei Betonplatten, 60 Bolzenverbindungen in 30 Gruppen, 16 Stahlwinkeln und 16 Ankerstäben. Darüber hinaus werden in der Vorfertigung Fußplatten mit den Stützen und beidseitig Stirnplattenanschlüsse an einen der Träger geschweißt.

Die im Modell verwendeten Bolzen haben den gleichen Durchmesser, um die Lagerhaltung zu vereinfachen [23].

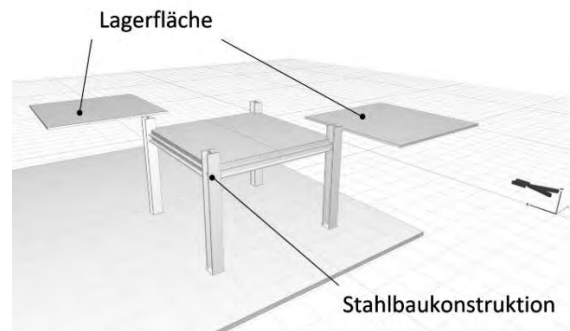


Abbildung 2: Layout des Anwendungsbeispiels

#### 3.2 Durchführung der Logistikplanung

Für die Planung der zugehörigen Prozesse auf der Baustelle wird zunächst auf Basis des BIM-Logistikmodells zum Anwendungsbeispiel eine Bauanleitung semi-automatisch erstellt. Mittels dieser Bauanleitung werden sechs aufeinanderfolgende Bauprozesse (Errichtung von vier Stützen, Einbau von Trägern und Geschossdecke (bestehend aus zwei Betonplatten)) definiert. Dabei wird der Aufbau des Fundaments nicht berücksichtigt, da bei dem Anwendungsbeispiel ausschließlich Bauprozesse der Stahlkonstruktion betrachtet werden. Um die Logistikplanung durchführen zu können, werden Annahmen bezüglich der Anlieferungen der Bauteile getroffen. Insgesamt werden drei Anlieferungen geplant (zwei Anlieferungen für die Stahlträger und Stahlstützen sowie eine Anlieferung der Geschossdecke), die Anlieferungen sollen in Abhängigkeit von definierten Szenarien vor dem Beginn der Montageprozesse erfolgen. Für die Definition der Planungsszenarien werden auch Annahmen bezüglich der auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Ressourcen und Baustellenmitarbeiter getroffen. Somit werden für das Anwendungsbeispiel zwei Planungsszenarien ausgewählt. Im ersten beispielhaften Planungsszenario sind ein Kran und zwei Baustellenmitarbeiter (ein Monteur und ein Kranführer) eingeplant. Die sechs Montageprozesse werden hier gemäß der Bauanleitung nacheinander ausgeführt, die drei Anlieferungen der Bauteile erfolgen durch Lieferanten; alle Bauteile werden vor ihrer Montage zwischengelagert und mit dem Kran zum Montageort transportiert und montiert. Die Anforderungen an die Transporte und Lagerungen der einzelnen Bauelemente werden gemäß der Ontologie definiert. Im zweiten Planungsszenario sollen die Montageprozesse der Stahlstützen parallelisiert werden (d. h., es werden jeweils zwei Stützen gleichzeitig montiert); anschließend

werden, wie im ersten Szenario, Stahlträger und Geschossdecke nacheinander aufgebaut. Die Anlieferungen der Bauelemente erfolgen auch hier vor der Montage der Bauelemente zur Anlieferungsfläche, anschließend werden die Bauelemente je nach Bedarf gelagert. Um das zweite Planungsszenario zu realisieren, wird zusätzlich zu den eingeplanten Ressourcen aus dem ersten Planungsszenario ein zweiter Kran eingeplant.

Aus dem BIM-Modell und dem dazugehörigen Layout werden die einzelnen Positionen der Objekte, Lagerflächen und Montageorte auf der Baustelle und die Längen der Transportwege zwischen diesen Positionen bestimmt. Für das Anwendungsbeispiel wird neben einer Anlieferungsfläche auch ein offenes Baustellenlager eingeplant. Auf dieser Basis können die Zeiten der Transporte auf der Baustelle berechnet werden. Unter Berücksichtigung der projektrelevanten Termine, der Montage Reihenfolge und der logistischen Abläufe werden die zwei ausgewählten Szenarien in Form von Gantt-Diagrammen dargestellt. In den Planungsszenarien werden die einzelnen Termine der geplanten Abläufe auf der Baustelle (Transporte, Lagerungen und Montagen) und die Liefertermine koordiniert. Somit kann mittels der Planungsszenarien die Projektdauer bis zur Fertigstellung der Großanlage näherungsweise bestimmt werden. Für die Gestaltung der Transporte und Lagerungen werden u. a. Informationen zu Material- und Ressourcenanforderungen für jeden Prozess (z. B. Lagerbedingungen für Stahlträger) aus der fachspezifischen Ontologie verwendet.

### 3.3 Durchführung der Simulation

In der Simulation werden die in den Szenarien geplanten Prozesse (Logistik- und Montageprozesse) und der Einsatz verschiedener Ressourcen auf der Baustelle überprüft. Das Simulationsmodell berücksichtigt hierfür Personal, Ausführungszeiten, Material und Ressourcen. Für seine Erstellung werden als Eingangsdaten der Termin- und Ablaufplan (Startpunkt, Dauer und Reihenfolge der Prozesse), die Anlieferungstermine, die Material- und Ressourcenanforderungen für jeden Prozess sowie die Angaben für die Gestaltung der Bauprozesse, Warenannahme und Transportvorgänge verwendet. Ein gemäß dem Terminplan generierter Auftrag durchläuft während der Simulation einen in einem Planungsszenario definierten Prozess (z. B. Warenannahme, Lagerungen, Transporte und Montage). Die Aufträge enthalten die notwen-

digen Informationen, um jeden Prozess richtig und vollständig abzubilden (z. B. Ressourcenanforderungen, Lademenge, Stückliste der Bauprozesse, Startzeitpunkt und Dauer).

Die Prozessabläufe (Krantransporte, Anlieferung auf der Baustelle sowie Montage und Vormontage) werden als Referenzprozesse im Simulationsmodell nachgebildet und laufen während der Simulation entsprechend der Vorgaben in dem definierten Planungsszenario ab. Die modellierten Referenzprozesse entsprechen einer allgemeingültigen Prozessbeschreibung auf der Baustelle (BPMN-Referenzprozesse). Sie können somit auch bei neuen Bauprojekten und Planungsszenarien erweitert, angepasst und wiederverwendet werden.

Im Simulationsmodell (vgl. Abbildung 3) werden auch das Layout, die Positionen der sechs Montageorte der einzelnen Bauelemente und die relevanten Prozesse (als Warteschlangen für die Montageprozesse im Bereich „Processes“ und für die Lagerungen im Bereich „Storages“) nachgebildet. Zudem werden als Ressourcen im ersten Planungsszenario ein Kran, ein Kranführer und ein Arbeiter hinterlegt, die bei Bedarf (bspw. im zweiten Planungsszenario) um weitere Ressourcen (bspw. um einen zweiten Kran) ergänzt werden können. Die Planungsdaten, wie die Reihenfolge der Lieferungen, der Montage, der Lager- und Transportprozesse, die Stücklisten für jeden Bauprozess, die bei den Prozessen verwendeten Ressourcen, die geplanten Ankunftszeiten der Lieferungen auf der Baustelle sowie die geplanten Startzeitpunkte der Bauprozesse, werden in Form von definierten Tabellen in dem Simulationsmodell implementiert. Nach Durchführung der Simulationsläufe können die Planungszeiten (Start- und Endzeitpunkte der Bauprozesse in der Projektplanung) und die simulierten Zeiten der Montageprozesse verglichen werden. Mit Hilfe der Simulation wird sichergestellt, dass die Komponenten nur dann geliefert werden, wenn sie bedarfsgerecht gelagert, transportiert oder direkt eingebaut werden können. Somit wird während der Simulation geprüft, ob die für ein Bauprojekt eingeplanten Ressourcen für die Fertigstellung der Anlage ausreichen.

Im Fall eines Fehlers im Planungsszenario wird während der Simulation eine Fehlermeldung ausgegeben (z. B., dass ein Montageprozess nicht ausgeführt werden kann, da die notwendige Ressource nicht frei ist).

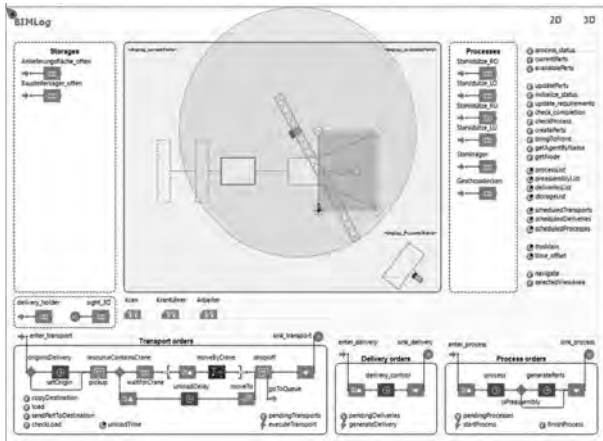


Abbildung 3: Simulationsmodell in AnyLogic

Die simulierten Zeiten der Montageprozesse werden während der Simulation in einer Tabelle eingetragen. Somit können die Dauer der einzelnen Bauprozesse (in Abstimmung mit den simulierten Transport- und Lagerprozessen) und die gesamte Projektdauer näherungsweise bestimmt werden. Auf diese Weise wird simulativ die Bauanleitung überprüft. Die Animation der Prozesse verdeutlicht den simulierten Ablauf der Anlieferungen der Bauelemente, der Montage- und Logistikprozesse (inkl. Transportvorgänge und Lagerungen der Bauelemente) auf der Baustelle. Zur Bewertung der Planungsszenarien (z. B. 1. Planungsszenario mit einem Kran und 2. Planungsszenario mit zwei Kränen) werden neben den simulierten Prozesszeiten auch Leistungskennzahlen wie Auslastung der Ressourcen (in Prozent) und Auslastung der Lagerflächen (in Lagereinheiten) über die gesamte Dauer des Projekts protokolliert (siehe Abbildung 4 für das erste Planungsszenario).

### 3.4 Simulationsergebnisse

Durch die Simulation der beiden oben beschriebenen Planungsszenarien werden nicht nur die geplanten Termine und Annahmen überprüft, sondern auch die Abstimmung der Montagerihenfolge mit den logistischen Prozessen validiert. Dabei werden die tatsächlichen Start- und Endzeitpunkte der Montageprozesse in Tabellen festgehalten (für das erste Planungsszenario mit einem Kran beträgt die simulierte Projektdauer 118,3 Stunden, für das zweite Planungsszenario mit zwei Kränen beträgt die simulierte Projektdauer insgesamt 93,3 Stunden) und die Lager- und Ressourcenauslastungen ausgewertet. Auf dieser Basis können die geplanten Planungsszenarien angepasst und ggf. verbessert werden.

Die Diagramme zur Auslastung der Ressourcen und

Arbeiter (Abbildung 4) verdeutlichen, dass beim ersten simulierten Planungsszenario der Kran und der Kranführer vor allem zu Projektbeginn fast immer vollständig ausgelastet sind. Bei der Auslastung der Lagerflächen ist erkennbar, dass am Anfang der Bauprozesse die Anlieferungsfläche eine hohe Auslastung hat und dass der Bestand im Lager über die betrachtete Projektdauer sehr gering ist (maximal drei Ladeeinheiten).

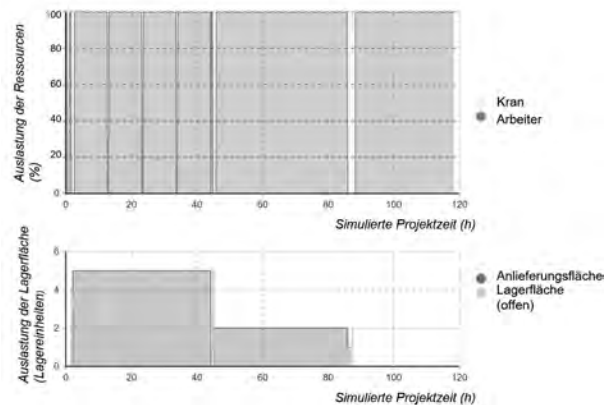


Abbildung 4: Ausgewählte Simulationsergebnisse

Bei dem zweiten Planungsszenario wird durch den Einsatz von zwei Kränen auf der Baustelle die Auslastung der einzelnen Kräne über die Projektdauer reduziert. Allerdings ist die Kollisionsprüfung der beiden Kräne bei einer Logistiksimulation nicht Gegenstand der Betrachtung; dazu müssen entsprechende 3-D Kollisionsuntersuchungen durchgeführt werden. Die Auslastung der Lagerfläche ist ähnlich niedrig wie im ersten Szenario, sodass die Dimensionierung der Lagerflächen bei beiden Szenarien gleichbleibt; allerdings kann die Projektdauer im zweiten Planungsszenario gegenüber dem ersten Szenario reduziert werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt eine BIM-basierte Vorgehensweise vor, mit der eine digitale Planung der Baustellenlogistik realisiert werden kann. Bei der Planung wird insbesondere der Zusammenhang zwischen der Montage und Logistik der einzelnen Bauelemente und -materialien berücksichtigt. Dazu wird das logistikrelevante Planungswissen in einer Ontologie modelliert. Mit den Informationen aus dieser Ontologie können BIM-Modelle erweitert werden. Die für diese BIM-Modelle erstellten Bauanleitungen bilden die Basis für die Erstellung von Planungsszenarien. Mit der simulationsgestützten Überprüfung dieser Planungsszenarien liegt ein konsistentes und

valides BIM-basiertes Logistikmodell vor; dieses Modell kann auch als Basis für die Steuerung der Logistik auf der Baustelle verwendet werden.

In den obigen Untersuchungen zum Anwendungsbeispiel wird die Simulation nur zur Absicherung von Planungsszenarien mit festgelegten Transportaufträgen verwendet. Die Evaluation des BIM-basierten Vorgehens zur Baustellenplanung hat jedoch gezeigt, dass es sinnvoll sein kann, das Simulationsmodell so zu erweitern, dass es auch für eine umfangreichere Planung der Logistikprozesse auf der Baustelle einsetzbar wird.

Zukünftig werden auf Grundlage der erzielten Ergebnisse weitere Forschungen zum Thema digitale Planung und Steuerung der Baustellenlogistik durchgeführt. Ein wichtiges Forschungsziel ist in diesem Zusammenhang die automatische Erstellung von Logistikmodellen für die Baustelle und ihre semi-automatische Validierung mittels Simulation.

**Danksagung.** Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „BIMLog - BIM-basierte Logistikplanung und -steuerung im Großanlagenbau“, das unter der IGF-Vorhaben-Nummer 19720 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) geführt und über die Allianz industrieller Forschung (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

## Literatur

- [1] Schuh G, Hering N, Brunner A. Einführung in das Logistikmanagement. In Schuh G., Stich V., editors. *Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management*. 2 Auflage. Berlin: Springer; 2013. S. 1–33.
- [2] Schach R, Schubert N. Logistik im Bauwesen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*. 2009; 58(1-2): 59–63.
- [3] Wenzel W, Gliem D, Laroque C, Kusturica W. Sichere Prognose der Dauer logistischer Prozesse. *Industrie 4.0 Management*. 2018; 34(5): 43–46.
- [4] Kügler M. CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel: Kassel University Press. 2012.
- [5] Bernd F. Die Entwicklung projekt- und fertigungsspezifischer Baulogistikprozesse. In Volkhard F., editor. *Simulation von Unikatprozessen – Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis*. Kassel: Kassel University Press; 2011. S. 45–62.
- [6] Liu H, Al-Hussein M, Lu M. BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. *Automation in Construction*. 2015; 53: 29–43.
- [7] Horenburg T. Simulationsgestützte Ablaufplanung unter Berücksichtigung aktueller Baufortschrittsinformationen. München: Technische Universität München. 2014.
- [8] Kalusche W. Projektmanagement für Bauherren und Planer. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. 2012.
- [9] Hofstadler C. Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Berlin: Springer. 2007.
- [10] Weber J. Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten. Dortmund: Universitätsbibliothek Technische Universität Dortmund. 2007.
- [11] Whitlock K, Abanda FH, Manjia MB, Pettang C, Nkeng GE. BIM for Construction Site Logistics Management. *Journal of Engineering, Project & Production Management*. 2018; 8(1): 47–55.
- [12] Baumgärtel T, Borrmann A, Günthner WA, Juli R, Klauert C, Lederhofer E, Mack J, Willberg U. Bauen heute und morgen. In Günthner W., Borrmann A., editors. *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Berlin: Springer; 2011. S. 1–21.
- [13] Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. Building Information Modeling. Wiesbaden: Springer. 2015.
- [14] Nävy J. Facility Management. Grundlagen, Informationstechnologie, Systemimplementierung, Anwendungsbeispiele. 5 Auflage. Berlin: Springer. 2018.
- [15] Smith P. BIM & the 5D Project Cost Manager. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014; 119: 475–484 [https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.053]
- [16] Astour H. Entwicklung eines BIM-basierten Systems zur Entscheidungsunterstützung mittels Simulation für die Baustelleneinrichtungsplanung. Kassel: Kassel University Press. 2015.
- [17] Cheng JCP, Kumar S. A BIM-Based Framework for Material Logistics Planning. In Seppänen O., González V.A., Arroyo P., editors. *23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*; 2015. Perth, Australia. S. 33–42.
- [18] Kim H, Anderson K, Lee S, Hildreth J. Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. *Automation in Construction*. 2013; 35: 285–295.
- [19] Song S, Yang J, Kim N. Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction. *Construction Innovation*. 2012; 63(9): 895–912.
- [20] Schober K.-S., Hoff P. Think act. Beyond Mainstream: Digitalisierung in der Bauwirtschaft.: Der europäische Weg zur Digitalisierung; 2016. URL: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_digitalisierung\\_bauwirtschaft\\_final.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_digitalisierung_bauwirtschaft_final.pdf).
- [21] Wenzel S. Simulation logistischer Systeme. In Tempelmeier H., editor. *Modellierung logistischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. S. 1–34.
- [22] Wenzel S, Stolipin J, Weber J, König M. Digitale Planung der Baustellenlogistik im Großanlagenbau Ontologie zur Nutzung digitaler Modelle für die Logistikplanung auf der Baustelle. *Industrie 4.0 Management*. 2019; (3): 55–59.
- [23] Lohse W, Laumann J, Wolf C. Stahlbau 1: Bemessung von Stahlbauten nach Eurocode mit zahlreichen Beispielen. Springer-Verlag. 2016.