

Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken

F. Berner, I. Habenicht, V. Kochkine, S. Spieckermann, C. Väth

Zusammenfassung Bauprojekte optimal zu gestalten, setzt einen effizienten Einsatz aller vorhandenen Ressourcen voraus. Arbeitskräfte, Material und Maschinen sowie die Versorgung mit Energie und Information jeglicher Art sind sinnvoll zu planen, aufeinander abzustimmen und, sofern es die Situation erfordert, auch kurzfristig an sich verändernde Randbedingungen anzupassen. Häufige (Planungs-)Änderungen während der Bauausführung, die Vielfalt der Beteiligten unterschiedlicher Gewerke sowie die hohe Komplexität der interagierenden Prozesse bei der Herstellung eines Bauwerks erfordern innovative Möglichkeiten, mit denen prozess- und kostenbeeinflussende Entscheidungen unterstützt werden können – ein Werkzeug, mit welchem die Gestaltung, Eingriffe und Anpassungen des Herstellungsprozesses inklusive seiner einzelnen Teilprozesse auf bestmögliche Effizienz überprüft werden können. Hier setzt die ereignisdiskrete Simulation an. Eine Forschungsgruppe, bestehend aus dem Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart, der IWTI GmbH und der SimPlan AG, hat den Herstellungsprozess eines Stuttgarter Hotelprojekts in allen Details simuliert, um damit die aus der stationären Industrie bekannten Vorgehensweisen hinsichtlich der Anwendbarkeit im Bauwesen zu überprüfen und auf die baulichen Spezifika anzupassen. Die hierbei gewählte Vorgehensweise, die aufgetretenen Herausforderungen sowie die bei diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Artikel vorgestellt.

Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner

Universität Stuttgart
Institut für Baubetriebslehre
Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart
+49 (711) 685 – 66144
fritz.berner@ibl.uni-stuttgart.de

Dr. rer. nat. Ilka Habenicht

SimPlan AG, Maintal
Edmund-Seng-Str. 3–5, 63477 Maintal
+49 (6181) 402 96 – 11
ilka.habenicht@simplan.de

Dipl.-Ing. Vitali Kochkine

Universität Stuttgart
Institut für Baubetriebslehre
+49 (711) 685 – 66161
vitali.kochkine@ibl.uni-stuttgart.de

Dr. rer. pol. Sven Spieckermann

SimPlan AG, Maintal
+49 (6181) 402 96 – 14
sven.spieckermann@simplan.de

Dr.-Ing. Cornelius Väth

Institut für wirtschaftliches
und technisches Immobilienmanagement
– IWTI GmbH
Curierstraße 2, 70563 Stuttgart
+49 (711) 912 910 – 16
vaeth@iwti.de

Simulation in Manufacturing Planning of Buildings

Abstract Optimal planning of construction projects requires a sufficient use of all available resources. Labor, material, equipment and the supply of energy and information of any kind are to be planned, coordinated and, if the situation requires, quickly adapted to varying conditions. Frequent (design) changes during construction, the diversity of stakeholders of different fields and the high complexity of interacting processes in building manufacturing require innovative ways to support process-influencing decisions – a tool which allows testing interventions and adjustments in the manufacturing process, including individual sub-processes with the best possible efficiency. This is where the discrete-event simulation can be used. A research group consisting of the Institute of Construction Management of the University of Stuttgart, IWTI GmbH and SimPlan AG simulated the manufacturing process of a hotel project in Stuttgart in all details to question practices known from the stationary industry and their applicability in construction and to scrutinize and to adjust them accordingly to the construction specifics. The approach taken here, the challenges encountered and insights gained from this research will be presented in this article.

1 Grundlagen

1.1 Planung bei Bauwerken

Um ein Projekt erfolgreich zu verwirklichen, ist eine ganzheitliche gut überlegte Planung unerlässlich. Für die erste Abschätzung, ob das Vorhaben insgesamt gelingen wird, sind genaue Kenntnisse über die gewünschten Projektziele erforderlich. Soll das Projekt darüber hinaus mit Sicherheit erfolversprechend sein, so ist umfangreiches Wissen über die Gesamtabwicklung eine zwingende Voraussetzung. In der Baubranche wird bis heute oftmals unter Planung nur der Bauwerksentwurf verstanden. Hierzu beauftragt der Bauherr Architekten und Fachingenieure. Sie gestalten die geometrische Form des Bauwerks, legen die einzusetzenden Materialien fest und nehmen eine überschlägige Kostenbetrachtung vor. Als Orientierung für die hierbei zu erbringenden Planungsschritte werden zumeist die Leistungsbilder und die entsprechenden Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) herangezogen. Gleichzeitig werden alle für die Herstellung von Bauwerken relevanten Gesetze, Vorgaben, Regelwerke und Verordnungen berücksichtigt. Die Planung ist je nach Projektgröße und Projektart unterschiedlich detailliert. Sofern es keine Änderungen oder Ergänzungen in der weiteren Projektentwicklung gibt, ist die Bauwerksplanung jedoch in der Regel auf einem hohen Niveau. Defizite treten in der Detailplanung des Bauwerks nur vereinzelt auf, z. B. wenn die Abstimmung der Fachplaner untereinander unzureichend ist. Ergänzt wird die planerische Darstellung des Bauwerks häufig um eine entsprechende Baubeschreibung. Hiermit gelten die Planungsaufgaben als vermeintlich ausreichend beschrieben.

Für den ganzheitlichen Projekterfolg ist es jedoch zwingend erforderlich, dass nicht nur das Bauwerk als Endprodukt planerisch detailliert erfasst ist. Vielmehr sollte auch der

bauliche Herstellungsprozess als wesentlicher Bestandteil bereits in der Planung bedacht werden. Bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. die Herstellung von Fertighäusern, erfolgt eine derartige Gesamtbetrachtung in der Regel nicht. Es wird davon ausgegangen, dass die mit der Erstellung des Bauwerks beauftragten Bauunternehmen aufgrund ihrer Erfahrung wissen, wo, wann und vor allem wie sie das Vorhaben im Einzelnen umzusetzen haben. Da sich die bauliche Produktion aus einem komplexen logistischen System von Personen, Maschinen, Werkzeugen und Materialien zusammensetzt, treten in der Umsetzung oft Defizite auf, die zu unnötigen Kosten, einer längeren Bauzeit und geringerer Qualität führen können [1]. Hier setzt die Fertigungsplanung an.

1.2 Planung der baulichen Fertigung

Die Gesamtbetrachtung von Bauwerk und Herstellungsprozess ist im Aufgabenbereich der am Bau beteiligten Planer nicht zu finden – zu Recht. Die Verantwortung, ein bestimmtes Ergebnis (Bausoll) in einer festgelegten Zeit zu den vorher veranschlagten Kosten zu realisieren, kann nur auf denjenigen am Bau Beteiligten sinnvoll übertragen werden, der den Herstellungsprozess bestimmen und kontrollieren kann. Diese Aufgabe kann einem Generalunternehmer zufallen, der jedoch auch seinerseits schnell an Grenzen stößt, wenn er den Nachunternehmern alle Einzelheiten der Fertigung präzise vorgeben wollte. Wird ein Bauprojekt gar gewerkweise oder in einzelnen Teillosten vergeben, ist eine umfassende und integrierte Fertigungsplanung praktisch unmöglich.

Heute beschränkt sich die Fertigungsplanung in Form der sogenannten Arbeitsvorbereitung in der Regel auf eine manuelle Vorbereitung der Bauausführung. Die weitestgehend isolierten und oftmals oberflächlichen Überlegungen umfassen die Planung der Termine, die Konzeptionierung einzelner Phasen der Baustelleneinrichtung sowie die Betrachtung von Teilen der Logistikkette. Nach einmaliger Ausführung gilt die Arbeitsvorbereitung meist als abgeschlossen, so dass es der Bauleitung vor Ort obliegt, den tatsächlich erforderlichen Personal- und Ressourceneinsatz im Detail kurzfristig zu planen, mit spontanen Ausgleichsmaßnahmen auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren und deren Auswirkungen auf spätere Nachtragsforderungen abzuschätzen [2].

Zusätzlich basieren große Teile der Planung auf Erfahrungswerten und Annahmen, die beispielsweise mittels Netzplantechnik in die Ablaufplanung einfließen. Aufgrund dieser ungenauen und lückenhaften Eingangsdaten stimmen geplanter und real eintretender Ablauf häufig nicht überein, so dass die Vorgaben der Arbeitsvorbereitung lediglich als Richtwerte verstanden werden. Es fehlt den Beteiligten daher häufig das Vertrauen in eine solch ungenaue Planung, was zu Unsicherheiten bei der Ressourcenbereitstellung führt. Die bereits durch die unpräzisen Vorgaben induzierten Abweichungen zwischen der Realität und der Planung können zu Terminverschiebungen im Bauprozess führen. Diese aufzufangen erfordert in den meisten Fällen spontane operative Gegensteuerungsmaßnahmen, die zusätzliche Vergütungsforderungen zur Folge haben können.

Auch die große Zahl an nicht abwendbaren, teilweise gravierenden Änderungen während der Bauausführung lässt eine geringe Planungstiefe akzeptabel erscheinen. Außerdem wird die für die bauliche Umsetzung maßgebende Ausführungs-

planung nach dem Grundsatz des „Simultaneous Engineering“ erst während der Bauausführung ausgearbeitet und ständig fortgeschrieben. Das heißt, die für die genaue Planung des Bauablaufs notwendigen Informationen liegen zum Zeitpunkt der Arbeitsvorbereitung noch nicht vor.

Demzufolge wäre eine auf Basis dieser unzureichenden Datengrundlage erstellte Detailablaufplanung nicht zielführend. Eine grobe Planung für den Bauablauf, der vielen Änderungen unterworfen ist, sei bei derzeitigem Stand aufschlussreich genug. Dem zusätzlichen Aufwand für eine langfristige und detaillierte Planung würden gegenwärtig keine nennenswerten Vorteile gegenüberstehen. Diese Problematik wird durch den Unikatcharakter der Bauvorhaben wesentlich verstärkt.

1.3 Potentiale der Fertigungsplanung

Der Unikatcharakter von Bauwerken erschwert die Übertragbarkeit der bei einem Projekt angewendeten Fertigungsabläufe auf weitere Bauvorhaben [3]. Auch die Fertigungsplanung muss auf jedes Produkt neu und individuell abgestimmt werden. Da sich ein hoher Automatisierungsgrad aufgrund der Einmaligkeit des Produkts nicht als effektiv erweisen würde, handelt es sich häufig um vorwiegend manuell ausgeführte Montage- und Logistikprozesse.

Darüber hinaus gilt es bei Bauprojekten, weitere Spezifika bereits in der Fertigungsplanung zu berücksichtigen. Die sich ändernden Einsatzorte (Baustellen) bieten zwar die Möglichkeit einer Anpassung der Produktionsstätten an das jeweilige Produkt, erschweren aber auch das Bereitstellen von optimal gestalteten Rahmenbedingungen. Montage- und Logistikprozesse greifen oft auf dieselben Ressourcen zurück, was die Verzahnung dieser Prozesse und ihre gegenseitige Wechselwirkung verstärkt und zu unkontrollierbaren Kettenreaktionen bei äußeren Einflüssen führen kann.

Auch herrscht bei Bauprojekten in der Regel sowohl in der Planungsphase als auch während der Ausführung ein hoher Termin- und Kostendruck. Dies lässt einerseits weniger Spielraum für eine ausgedehnte Planungsphase, erfordert andererseits aber eine gut vorbereitete Ausführung – was einen gewissen Widerspruch darstellt. Es sollte daher bei jedem Projekt im Einzelfall hinterfragt werden, inwiefern durch den Mehraufwand in der Planungsphase ein Effizienzgewinn in der Ausführungsphase zu erwarten ist.

Erfahrungen aus anderen Branchen, die sich ebenfalls mit der Herstellung von Unikaten befassen, zeigen allerdings, dass eine feingliedrigere Planung der Fertigungsabläufe erhebliche Potentiale birgt, sofern die erforderliche Datengrundlage geschaffen werden kann. Die Fertigungsplanung kann schon mit den ersten Zügen der Produktplanung aufgenommen und derart ausgelegt werden, dass sie später mit weiteren Details sinnvoll erweiterbar ist. Die Aussagekraft der Fertigungsplanung steigt mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Produktplanung und führt am Ende zu einer verlässlichen Darstellung des Produktionsablaufs.

Im Zuge der strategischen Planung wird der Fertigungsprozess im Vorfeld beschrieben. Schon in dieser Phase lassen sich die ersten Aussagen über Ressourceneinsatz und Ablaufdauern mit einer gewissen Verlässlichkeit treffen. Durch die spätere Detaillierung lässt sich diese Aussage präzisieren und in genaue Ressourceneinsatzpläne überführen. Die Anzahl der unvorhergesehenen Ereignisse nimmt deutlich

ab. Die Reaktionen auf Störungen durch äußere Einflüsse lassen sich besser koordinieren, was die operative Steuerung der Fertigung erheblich unterstützt. Die einzelnen Vorgänge werden im Hinblick auf Ressourcenbeanspruchung und zeitlichen Ablauf aufeinander abgestimmt. Hierbei steht die Gesamtproduktion im Vordergrund und nicht das Interesse der einzelnen Beteiligten.

Auch die logistische Versorgung der gesamten Produktionsstätte sowie ihrer einzelnen Produktionseinheiten wird aus übergeordneter Sicht betrachtet, was Kollisionen und Konflikte zu vermeiden hilft [4].

Die genannten Vorteile bedürfen allerdings der Beschaffung und Verarbeitung einer großen Menge an Daten in relativ kurzer Zeit. Dies lässt eine manuelle Handhabung der Daten kaum praktikabel erscheinen, weshalb auf IT-unterstützte Lösungen zurückgegriffen werden muss. Diese müssen in der Lage sein, den gesamten Produktionsprozess inklusive der dynamischen Wechselwirkungen seiner Teilprozesse abbilden zu können. Die diskrete ereignisorientierte Simulation kann hier die Fertigungsplanung unterstützen.

2 Erfahrungen aus der Simulationsanwendung in der Unikatfertigung

Die diskrete ereignisorientierte Simulation ist inzwischen in vielen Industriezweigen eine etablierte Methode für die Untersuchung von Produktions- und Logistikprozessen im Rahmen der Fertigungsplanung [5]. Sie ist in allen Phasen der Planung und Realisierung der Produktion und Logistik ein anerkanntes Instrument [6]. Die Simulation wird in diesem Zusammenhang entsprechend der Definition angewendet [7]: "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."

Im Bereich der Unikatfertigung wird der Einsatz der Simulation durch die im vorigen Abschnitt beschriebenen Besonderheiten erschwert. In der Unikatfertigung, speziell im Bauwesen, spielt die Simulation immer noch eine untergeordnete Rolle [8]. Allerdings ist festzustellen, dass die Entwicklungen von Simulationsverfahren für die Anwendung in der Unikatfertigung zugenommen haben.

Als besonderer Anwendungsfall sei hier auf den Einsatz der Simulation im Schiffbau verwiesen. Die Flensburger Schiffbaugesellschaft mbH & Co. KG (FSG) wendet Simulation bereits in fast allen Fertigungsbereichen und in den unterschiedlichen Planungs- und Realisierungsstufen für den Bau der Schiffe an. Die Produktion eines jeden Schiffes wird bei

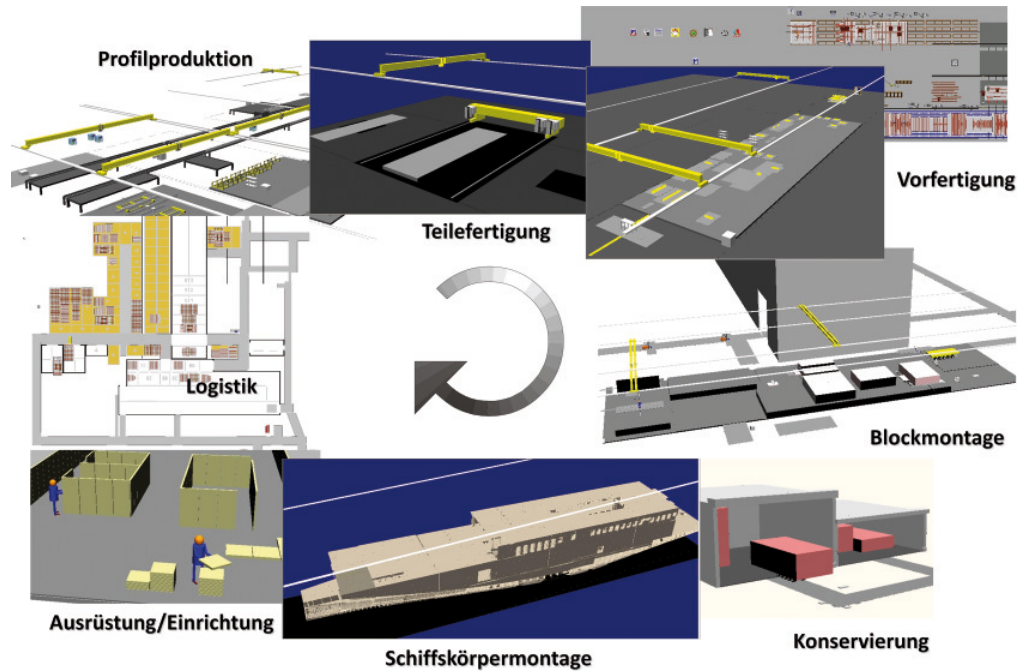


Bild 1. Anwendungsbereiche der Simulation im Schiffbau [10]

Fig. 1. Applications of Simulation in shipbuilding [10]

der FSG detailliert geplant und mittels Simulation unterstützt. Auf diese Weise konnten Produktivität und Liefertreue nachweislich erhöht werden [9].

Bild 1 zeigt die verschiedenen Anwendungsbereiche der Simulation bei der FSG. Mit Hilfe der Simulation kann bereits in frühen Planungsphasen erkannt werden, ob Liefertermine eingehalten werden können und wo sich Engpässe im Prozess befinden. So können mittels Simulation verschiedene Planungsvarianten getestet werden. Der Planer kann auf Basis der Ergebnisse die beste Variante auswählen.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich neben der simulationsbasierten Planung ist die Simulation als Steuerungsinstrument im operativen Betrieb. So werden beispielsweise Terminpläne mit Hilfe der Simulation auf Basis des aktuellen Fertigstellungsgrades aktualisiert. Im Fall einer Abweichung lassen sich frühzeitig Aussagen über die Auswirkungen auf den weiteren Fertigstellungsprozess treffen. Ein weiteres Ergebnis aus der Simulation sind die Einsatzpläne für die Ressourcen.

Die Datenbereitstellung erfolgt mit einer Simulationsdatenbank, die auf der Grundlage von Konstruktionsdaten, Terminplänen, Personaldaten und allen weiteren benötigten Informationen basiert [9]. Die Daten können dann im gewünschten Detaillierungsgrad und für die relevanten Bereiche zur Verfügung gestellt werden.

Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der Simulation in den verschiedenen Bereichen der Planung, Arbeitsvorbereitung und im operativen Betrieb ist eine Integration der Simulation in die Abläufe im Unternehmen, was vor allem eine Akzeptanz durch das Management voraussetzt. Die FSG verfügt über ein Simulationsteam, welches bereits seit mehr als zehn Jahren in dieser Form zusammenarbeitet. Die Mitarbeiter in der Planung und in der Fertigung, die die Simulationssoftware anwenden, werden durch das Simulationsteam geschult. Diese Maßnahme hilft, eine breite Akzeptanz der Simulation zu erreichen.

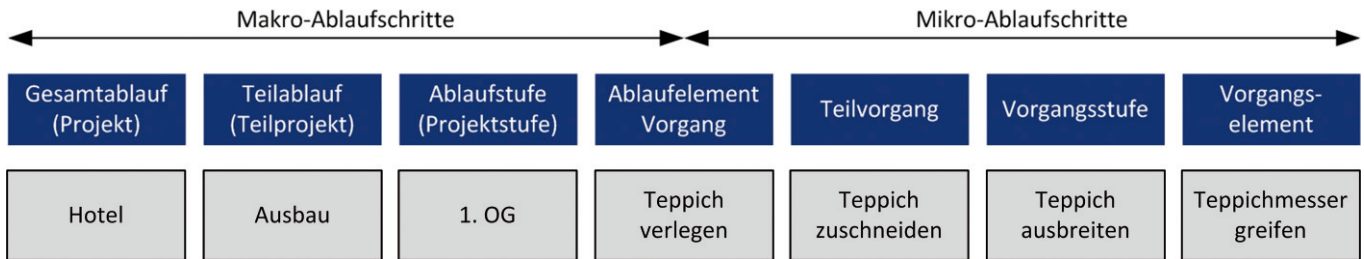


Bild 2. Vorgänge und Teilvorgänge nach REFA [3], [12]
 Fig. 2. Process part and process stage by REFA [3], [12]

3 Simulation in der baulichen Produktion

3.1 Anwendungsbereiche der Simulation in der Fertigungsplanung

Das Beispiel der FSG zeigt, dass eine Anwendung der Simulation bei der Unikatfertigung in verschiedenen Bereichen möglich ist. Bei Bauprojekten werden die Einsatzgebiete der Simulation vorrangig in der Fertigungsplanung gesehen [11]. So kann die Simulation bereits in der Angebotsphase genutzt werden, um beispielsweise auf Basis von Mengenströmen und Zeitabschätzungen Terminpläne zu generieren oder zu validieren, Logistikkonzepte zu prüfen und Engpässe zu identifizieren.

Im Rahmen der detaillierten Fertigungsplanung stehen weiterführende Zielstellungen im Mittelpunkt. Hier können tagesgenaue Ablaufpläne generiert werden. Auf Basis dieser Ablaufpläne kann der Einsatz der Arbeitskräfte oder sonstiger Ressourcen geplant werden.

Bei einer solchen Planung müssen die Anordnungsbeziehungen zwischen den Teilvorgängen berücksichtigt werden (Bild 2). Diese ergeben sich aufgrund der Geometrie des Bauwerkes oder technologischer Restriktionen. Außerdem wird hier der Ressourceneinsatz für die einzelnen Teilvorgänge untersucht. Mit Hilfe der Simulation lassen sich somit folgende Aspekte betrachten:

- Bestimmung Arbeitsabschnitte (tagesgenau).
- Überprüfung alternativer Arbeitsweisen, z. B. alternativer Reihenfolgen der Arbeitsschritte oder alternativer Ausführungskonzepte mit unterschiedlichem Ressourcenbedarf.
- Ermittlung des tagesgenauen Ressourcenbedarfs und der notwendigen Arbeitskräfte.
- Überprüfung alternativer Logistikkonzepte unter Berücksichtigung des dynamischen Umfelds.
- Identifikation von Engpässen.

Durch eine solche leistungsoptimierte Gestaltung des Wertschöpfungsprozesses und eine weitestgehende Vermeidung oder Verminderung nicht wertschöpfender Tätigkeiten lässt sich eine Optimierung des Ressourceneinsatzes erreichen. Die vertiefte Kenntnis der Teilprozesse sowie ein klares Erkennen der aus der Prozessvernetzung resultierenden Beeinflussung des Gesamtergebnisses ist hierzu Voraussetzung [13].

3.2 Vorgehen bei einer Simulationsstudie

Ein wichtiger Aspekt für den erfolgreichen Einsatz der Simulation ist die Akzeptanz der Ergebnisse bei den Beteiligten, die normalerweise keine Simulationsexperten sind. Deswegen ist es wichtig, ein Vorgehen zu wählen, welches auch von Außenstehenden nachvollzogen werden kann, weshalb sich die Fachgruppe "Simulation in Produktion und Logistik" der ASIM (Arbeitsgemeinschaft für Simulation in der Gesellschaft für Mathematik) in den letzten Jahren mit der Verbesserung der Qualität von Simulationsstudien beschäftigt hat [5]. Hierbei wurde ein Vorgehensmodell für die Durchführung von Simulationsstudien entwickelt, das in Bild 3 gezeigt wird.

Dieses Ablaufschema zeigt die einzelnen Schritte für die Modellbildung und Datengewinnung auf. Die verschiedenen Schritte werden iterativ abgearbeitet. Für jeden Schritt wird eine hinreichende Dokumentation gefordert, um die Transparenz beim Vorgehen im Rahmen der Simulationsstudie zu erhöhen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine durchgehende Verifikation und Validierung der Ergebnisse der einzelnen Schritte, um die Glaubwürdigkeit der Simulationsmodelle und der Ergebnisse solcher Studien zu erhöhen. Das Vorgehensmodell wird in diesem Abschnitt aus der Perspektive der Durchführung von Simulationsstudien im Bauwesen kurz zusammengefasst.

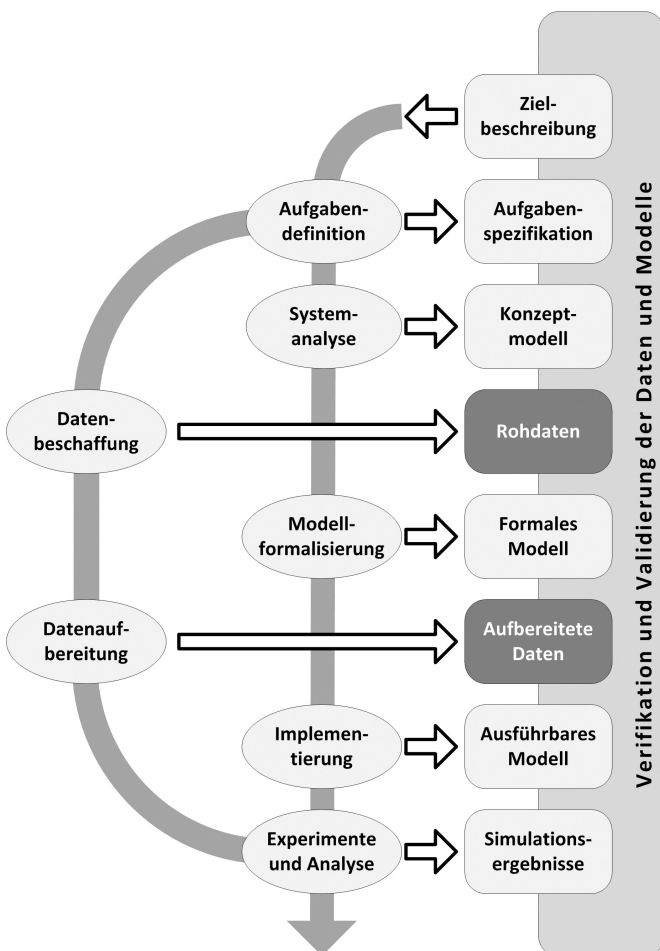


Bild 3. Ablaufschema zur Durchführung von Simulationsstudien [14]
 Fig. 3. Flow chart for conducting simulation studies [14]

Eine Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Simulationsstudie ist eine präzise Beschreibung der Zielstellung. Aus dieser Zielstellung wird die eigentliche Aufgabenstellung abgeleitet. Hier werden vor allem folgende Punkte betrachtet:

- Modellgrenzen,
- Detaillierungsgrad,
- Auswertungen.

Zu Beginn wird definiert, welche Prozesse mit welcher Genauigkeit bei der Simulation berücksichtigt werden. Vor der eigentlichen Implementierung des Simulationsmodells werden die zu betrachtenden Prozesse analysiert und beschrieben. Diese Systemanalyse beschäftigt sich somit intensiv mit den Abläufen des Bauprojektes. So müssen die Regeln für

- die Abfolge der einzelnen Prozessschritte,
- den Einsatz von Ressourcen oder
- Restriktionen, die sich beispielsweise aufgrund des Umfelds der Baustelle ergeben,

beschrieben werden. Im Rahmen der Fertigungsplanung sind solche Restriktionen zum Beispiel die zulässigen Bauzeiten oder Einschränkungen im Straßenverkehr, die somit die Logistik beeinflussen. Diese Systemanalyse erfordert in der Regel einen Dialog zwischen den Beteiligten, die die Abläufe auf der Baustelle kennen, und den Simulationsexperten, welche die Abläufe modellieren. Ergebnis der Systemanalyse ist ein sogenanntes Konzeptmodell mit einer vollständigen Beschreibung des Simulationsmodells. Das Konzeptmodell wird anschließend formalisiert, d. h. es wird abgeleitet, wie die einzelnen Prozesse oder die definierten Restriktionen im Simulationsmodell umgesetzt werden. Das Konzeptmodell ist die Basis für die Implementierung des Simulationsmodells.

Parallel zur Modellbildung (Systemanalyse bis Implementierung) müssen die Daten für die Simulationsstudie bereitgestellt werden. Die notwendigen Daten leiten sich aus der Aufgabenstellung ab. Bei Bauwerken sind dies Kennzahlen und Daten, die

1. das Bauwerk
(beispielsweise repräsentiert durch die BIM-Daten),
 2. die Ressourcen,
 3. die Fertigungsprozesse und
 4. die Restriktionen
- beschreiben.

Die Daten für das Bauwerk sind von der Planung erarbeitet worden. Sie erfordern für die weitere Bearbeitung im Simulationsmodell idealerweise keine zusätzliche Bearbeitung. Die Ressourcen sind im Einzelnen Arbeitskräfte, Baumaterialien, Baugeräte, Bauhilfs- und sonstige Stoffe, um das geplante Bauwerk zu erstellen. Um die Fertigung nun im Detail zu planen, sind die Daten aus dem Fertigungsprozess zwingend erforderlich. Diese Daten sind im Einzelnen: Zeitdauern von einzelnen Arbeitsschritten (Teilvorgängen nach REFA, Bild 2), räumliche Zuordnung der Arbeitsschritte (Arbeitsort), minimale und maximale Kolonnenstärken und der Bedarf an Fläche für Transport, Zwischenlagerung und Verarbeitung. Um den Fertigungsprozess abzubilden, sind vorgenannte Komponenten mittels Restriktionen zu verknüpfen. Dies sind technologische oder fertigungstechnische Abhängigkeiten (z. B. Erhärtungszeit oder Reihung der Bau-tätigkeiten), kapazitätsbedingte und sicherheitstechnische Abhängigkeiten.

Auf Basis der Kennzahlen eines Bauwerks können nun in einer Simulationsstudie die Abläufe der Fertigung abgebildet,

variiert und optimiert werden. Durch Veränderungen oder Anpassungen einzelner Kennwerte, wie z. B. Art und Anzahl der verfügbaren Ressourcen, können Szenarien verglichen werden, um daraus unterschiedliche Handlungsalternativen abzuleiten.

3.3 Ergebnisse der Simulation

Die Ergebnisse einer Simulation hängen von der individuellen Zielstellung der Simulationsstudie ab. In diesem Abschnitt sind mögliche Ergebnisse der Simulation auf Basis der o. g. Fragestellungen beschrieben. Es können beispielsweise die Start- und Endtermine einzelner Prozesse unter Berücksichtigung begrenzter Ressourcen und ihrer Abhängigkeiten bestimmt werden. Auf Basis dieser Daten wird die Ausführbarkeit der bestehenden Terminpläne mit Hilfe der Simulation überprüft. Alternativ können mit Hilfe der Simulation Terminpläne erstellt werden. Der Detaillierungsgrad dieser Terminpläne hängt dabei von der Detaillierung der modellierten Prozesse ab.

Ein weiteres mögliches Ergebnis ist die Auslastung des Personals oder sonstiger Ressourcen (Baugeräte, Baustelleneinrichtung etc.). Die Ergebnisse der Simulation können als Grundlage für die Einsatzplanung von Personal und sonstiger Ressourcen verwendet werden. Es lassen sich außerdem frühzeitig Engpässe erkennen und beseitigen.

4 Fertigungsplanung als Datengrundlage für die Simulation

4.1 Voraussetzungen für den Einsatz der Simulation in der Fertigungsplanung

Ein zentrales Argument gegen die Anwendung der Simulation für die Fertigungsplanung im Bauwesen ist, dass die Bereitstellung der Daten und somit die Modellierung zu aufwendig sind. Aufgrund des Unikatcharakters der Bauwerke ist eine Wiederverwendung der Modelle aus anderen Bauprojekten nur begrenzt möglich. Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der Simulation ist somit die effiziente Datenbereitstellung und Modellerstellung.

Es wurden bereits verschiedene Ansätze für die Simulation im Bauwesen entwickelt. Franz [15] stellt einen Ansatz für die Simulation von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen vor. Die Petri-Netze werden in diesem Zusammenhang verwendet, um die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Prozessen zu modellieren. Ein zweiter Simulationsansatz basiert auf der agentenbasierten Modellierung [16].

Ein weiterer Ansatz, der im Bauwesen Anwendung findet, ist die sogenannte constraintbasierte Modellierung [17]. Die Ausführung der Prozessschritte im Bauwesen unterliegt verschiedenen Restriktionen (Termine, Reihenfolgen, Material- und Ressourcenverfügbarkeit). Diese Restriktionen werden bei der Modellierung auf Basis sogenannter Constraints formuliert, wobei zwischen harten und weichen Constraints unterschieden wird. Harte Constraints werden für die Formulierung zwingend notwendiger Restriktionen genutzt, wie technologisch erforderliche Reihenfolgen. Weiche Constraints können zur Untersuchung unterschiedlicher Szenarien und Strategien genutzt werden.

Auf Basis dieses Modellierungskonzeptes können wieder verwendbare Modelle für die Simulation der baulichen Produktion erstellt werden. Diese Modelle können mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden arbeiten und sind somit

Art der Daten	Projektspezifische Daten		Allgemeingültige Daten	
	Beispiel	Quelle	Beispiel	Quelle
Objektdaten	Bauteileigenschaften: - Material - Menge - Geometrie - Lage	- Zeichnungen - Pläne - Gebäudemodelle - Arbeitsvorbereitung - Lagepläne	- Aufbau einzelner Bauteile	- Kataloge - Nachschlagewerke - Allgemeine Literatur - Produktspezifische CAD-Kataloge
Prozessdaten	- Lage der Lagerflächen - Zugangswege - Technologieanpassungen - Spezielle Abhängigkeiten	- Fertigungsplanung	- Aufwandswerte - Abhängigkeiten - Erforderliche Arbeitsräume - Arbeitskräfte - Rüst-, Hilfs- und Baustoffe	- Nachschlagewerke - Literatur - Unternehmensarchiv

Bild 4. Arten der Daten im Bauwesen
 Fig. 4. Types of data in construction

auch in den verschiedenen Phasen der Fertigungsplanung einsetzbar.

Für eine effiziente Modellierung der baulichen Produktion müssen Tools oder Bausteine verwendet werden, die nur geringe Anpassungen für die einzelnen Bauprojekte erfordern. Diese Voraussetzungen erfüllt beispielsweise ein Bausteinkasten wie das Simulation Toolkit Shipbuilding (STS). Der STS ist ein Bausteinkasten, den die FSG entwickelt hat und in ihren Simulationsprojekten anwendet [7]. Er basiert auf dem Simulationstool Tecnomatix Plant Simulation von Siemens PLM. Die Bausteine des STS sind in Kooperation mit der Ruhr-Universität Bochum, der SimPlan AG und der Bauhaus Universität Weimar für die Anwendung im Bauwesen erweitert worden.

4.2 Benötigte Daten und deren Quellen

Für die Simulation der baulichen Produktion werden einerseits Angaben über das zu erstellende Gebäude benötigt, andererseits aber auch prozessbeschreibende Daten. In beiden Fällen lassen sie sich in allgemeingültige oder projektspezifische Daten differenzieren. Die allgemeingültigen Daten behalten ihre Aussagekraft weitestgehend projektunabhängig. Projektspezifische Daten dagegen müssen von Projekt zu Projekt angepasst werden.

Die fehlende Genauigkeit der projektspezifischen Daten kann in den frühen Planungsphasen durchaus akzeptiert werden, wenn die Erwartungen an die Simulationsergebnisse in diesem frühen Planungsstadium dennoch ausreichend erfüllt werden. Mit dem Fortschritt der Planung erfolgt auch eine Konkretisierung der projektspezifischen Daten, so dass die Aussagen der Simulation sukzessive an Genauigkeit, Umfang und Belastbarkeit zunehmen.

Die in Bild 4 gezeigten projektspezifischen Objektdaten definieren das Bauvorhaben durch Material, Menge, Geometrie und Lage der einzelnen Bauteile. Diese Daten variieren von Projekt zu Projekt. Grundlage für die projektspezifischen Objektdaten stellen dabei Zeichnungen, Pläne, Gebäudemodelle, aber auch die Vorgaben aus der Arbeitsvorbereitung, Baustelleneinrichtungs- und Lagepläne dar.

Demgegenüber stehen die allgemeingültigen Objektdaten, die von Projekt zu Projekt unverändert bleiben, wie beispielsweise der Aufbau einzelner Bauteile. Diese allgemein-

gültigen Objektdaten befinden sich in Produktkatalogen, Regeldetails, Fachliteratur und in Nachschlagewerken. Diese Daten sind bei einzelnen Bauprojekten vorgegeben und genügen in der Regel den Anforderungen der Simulation.

Prozessdaten sind meistens allgemeingültig. Zu ihnen zählen Aufwandswerte, Abhängigkeiten zwischen einzelnen Teilvorgängen, erforderliche Arbeitsräume, minimale Anzahl und Mindestqualifikation der erforderlichen Arbeitskräfte sowie die benötigten Rüst-, Hilfs- und Baustoffe. Die seither in der Bauindustrie verwendeten Aufwandswerte sind hierfür zu ungenau, da nur Vorgänge, wie z. B. das Schalen einer Wand, erfasst sind. Um in der Simulation den Fertigungsprozess detailliert und aussagekräftig abzubilden, ist die Kenntnis von Fertigungsdauern für Teilvorgänge unerlässlich. Die allgemeingültigen Prozessdaten, bis auf die Aufwandswerte, können auch aus der einschlägigen Literatur oder aus Unternehmensarchiven stammen. Um Echtdaten bei den Aufwandswerten zu erhalten, müssen Zeitmessungen auf Baustellen vorgenommen werden.

Die allgemeingültigen Prozessdaten werden durch projektspezifische Prozessdaten, wie die Lage der Lagerflächen oder der Zugangswege, ergänzt. Projektspezifische Prozessdaten, wie Technologieanpassungen oder spezielle Abhängigkeiten, müssen im Rahmen der Fertigungsplanung erstellt oder ermittelt werden. Unter Technologieanpassungen versteht man z. B. die Anpassung von allgemeingültigen Werten, wie z. B. Aufwandswerte, an die für das Projekt gültigen oder gewählten, geänderten Bedingungen. Dies kann der Einsatz eines selbstverdichtenden Betons anstelle eines zu verdichtenden Betons sein. Spezielle Abhängigkeiten können z. B. die Erstellung von Schallschutzwänden unter vorhandenem Bahnbetrieb sein. Hier sind allgemeine Abhängigkeiten von anderen Bauprojekten nicht ableitbar.

Die gezeigte Fülle an erforderlichen Daten führt zu einem hohen Aufwand bei der Grundlagenermittlung für die Simulation. Die dargestellten Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen und liegen in unterschiedlicher Qualität vor.

Je nach Projektphase sind unterschiedliche Aussagen der Fertigungsplanung erforderlich. In den frühen Phasen, d. h. während der Angebotsbearbeitung oder der Grobterminplanung, sind z. B. Aussagen über eine grobe Ressourcenauslas-

tung und folglich über eine generelle Machbarkeit wichtig. Solche Aussagen werden durch die Simulation schon in diesen frühen Phasen unterstützt. Mit fortschreitender Fertigungsplanung durch die Eingabe detaillierterer Daten ergeben sich präzisere Aussagen über den Bauablauf.

5 Fallbeispiel

5.1 Anwendungsfall

Die Einsatzmöglichkeiten der Simulation im Bauwesen wurden von den Forschungspartnern Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart, IWTI GmbH und SimPlan AG im Rahmen eines Fallbeispiels näher untersucht. Ziel war es, die Möglichkeiten und Grenzen der Simulation in der Fertigungsplanung zu ergründen. Für die Simulationsstudie wurden die Ausbauarbeiten eines mehrgeschossigen Hotels modelliert. Die betrachteten Obergeschosse sind alle ähnlich strukturiert und verfügen über drei Zimmertypen, die sich in Ausstattung und Größe unterscheiden.

Der Ausbau der Zimmer ist jeweils durch dieselben Vorgänge gekennzeichnet. Die Ausführungsdauern dieser Vorgänge und ihrer Teilvorgänge hängen vom jeweiligen Zimmertyp ab. Die einzelnen Arbeitsschritte wurden von Arbeitern unterschiedlicher Unternehmen durchgeführt. Mit Hilfe der Simulation wurden die Anzahl der notwendigen Arbeiter und ihre Einsatzzeiten für die einzelnen Unternehmen bestimmt. Eine besondere Restriktion in diesem Anwendungsbeispiel sind die verfügbaren Flächen innerhalb eines Zimmers: Bei Vorgängen wie "Estrich legen" können in einem Zimmer parallel keine weiteren Tätigkeiten ausgeführt werden. Bei anderen Vorgängen dagegen werden nur Teile des Zimmers blockiert. In einem solchen Fall können gegebenenfalls auch mehrere Tätigkeiten zeitgleich erfolgen.

5.2 Datengewinnung für den Anwendungsfall

Die betrachtete Baumaßnahme war zum Untersuchungszeitpunkt vollständig abgeschlossen. Der Forschungsgruppe lagen daher alle Unterlagen sowohl der Bauwerks- als auch der Ablaufplanung vor. Die aus den Objektdaten ableitbaren Informationen waren vollständig, jedoch gestaltete sich die Erhebung der Prozessdaten weitaus schwieriger als vor dem Projekt angenommen (vgl. Datenmatrix in Bild 4). Trotz der Menge an verfügbaren Angaben zum Bauablauf, wie z. B. Terminpläne und Bautagebücher, waren die für die Simulation erforderlichen Eingangsdaten nur bedingt ableitbar. Die Qualität der Daten stellte sich als nicht ausreichend und der Informationsgehalt als nicht detailliert genug heraus. Am deutlichsten zeigte sich dieses Problem bei der teilvorgangsbezogenen Betrachtung des Baugeschehens. Zwar war die Unterteilung der Vorgänge in einzelne Teilvorgänge auf Grundlage der Erfahrung unmittelbar Beteiligten auch im Nachhinein noch möglich, jedoch fielen selbst den involvierten Bauleitern Aussagen über die Aufwandswerte der einzelnen Teilvorgänge und ihren Bedarf an Flächen sowie Arbeitskräften schwer. Z. B. war nur der Aufwandswert für das Verlegen des Teppichbodens pro m² bekannt. Die Auf-

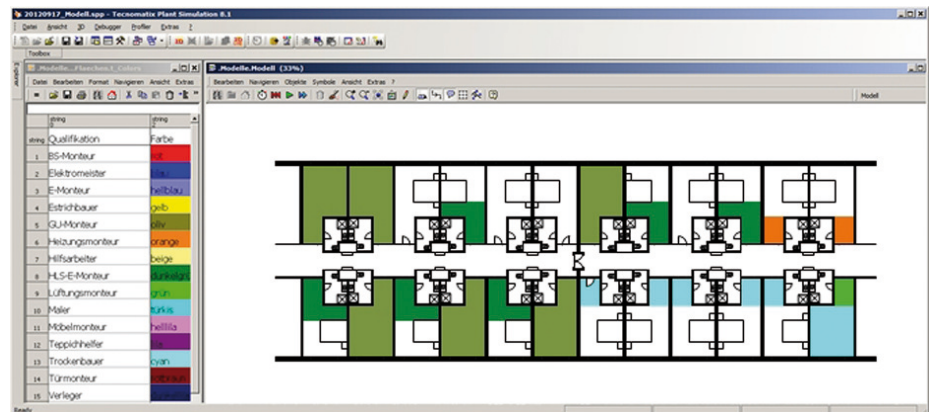


Bild 5. Momentane Belegung der Arbeitsflächen im Simulationsmodell

Fig. 5. Current assignment of the working areas in the simulation model

wände der einzelnen Teilvorgänge "Reinigen", Zuschneiden", "Kleber aufbringen", "Abschneiden der Trittschalldämmung" oder "Anbringung der Sockelleisten" waren nicht bekannt. Eine derartig detaillierte Betrachtung ist in der Baubranche zurzeit noch nicht üblich und gehört deshalb nicht zu den allgemein bekannten Erfahrungswerten. Um diese Einzelheiten dennoch für die Simulationsstudie zu gewinnen, mussten aus den bekannten Ablaufdaten der Baustelle Rückschlüsse gezogen werden, so dass plausible Annahmen getroffen werden konnten. Dafür wurden die tatsächlichen Ausführungsdauern der Vorgänge auf die Ebene der Teilvorgänge heruntergebrochen [12]. Diese Informationen wurden in umfangreichen Datenbanken zusammengetragen und im Simulationsmodell verwendet.

5.3 Durchführung der Simulationsstudie

Das Modell wurde mit Hilfe des Bausteinkastens STS erstellt (s. Kap. 4.1). Die Daten wurden über eine Excel-Schnittstelle eingelesen und in die Datenstrukturen überführt, die für die Modellierung erforderlich sind. Dieses Modell ist über eine Erweiterung der Daten für mehrere Geschosse und Zimmertypen anwendbar. Bild 5 zeigt eine momentane Belegung der Arbeitsflächen in einem Geschossteil im Simulationsmodell.

Bei der Durchführung eines jeden Teilvorganges werden die Reihenfolgebedingungen für den Ausbau eines Zimmers und die verfügbaren Personalressourcen berücksichtigt. Hierfür findet die Belegung der erforderlichen Flächen im Zimmer statt. Dies ist im Modell entsprechend animiert (siehe Bild 5). Die reservierten Flächen sind farblich gekennzeichnet, wobei die Farbe für die jeweilig auszuführende Arbeit steht.

In dem Modell wird die Auslastung der Arbeiter einzeln oder für jedes Unternehmen erfasst. Auf diese Weise kann wochen-, tages- oder stundengenau bestimmt werden, wann und wie viele Arbeiter eines Unternehmens benötigt werden. Bild 6a zeigt den Auslastungsgrad eines Unternehmens, das nur an fünf Tagen voll ausgelastet ist, wohingegen Bild 6b ein Beispiel darstellt, in dem ein Unternehmen über den gesamten Zeitraum eingesetzt ist, jedoch hierbei nur zu ca. 60 % ausgelastet ist.

Ergänzend wird für die einzelnen Vorgänge oder Teilvorgänge ausgewertet, wann und wo sie ausgeführt werden. Dies wird in Form eines Balkendiagramms abgebildet und kann in die Terminplanung einfließen.

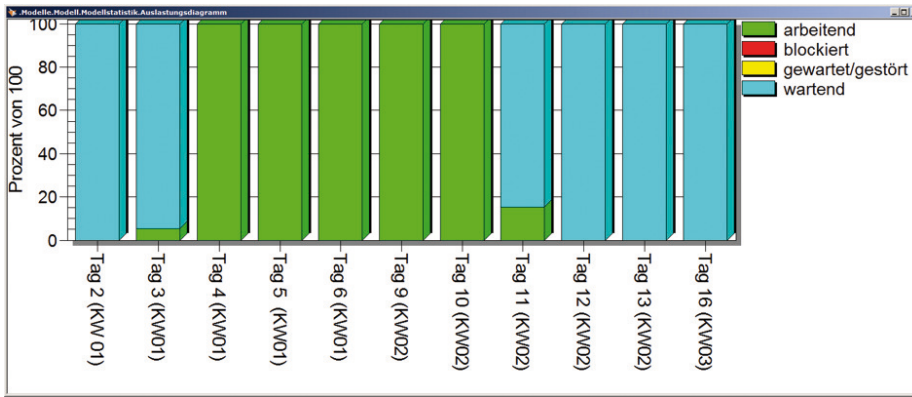


Bild 6a. Auslastungsdiagramm des Subunternehmers Elektro für die Haupttätigkeit [12]
 Fig. 6a. Summary diagram of the electrical subcontractor for the main activity [12]

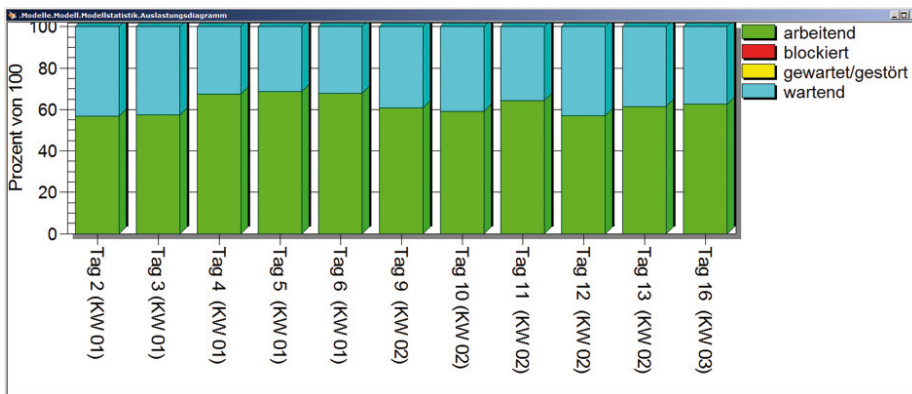


Bild 6b. Auslastungsdiagramm des Subunternehmers Trockenbau für die Haupttätigkeit [12]
 Fig. 6b. Summary diagram of the drywall subcontractor for the main activity [12]

In dem Modell ist bis jetzt noch unterstellt, dass die notwendigen Materialien immer vor Ort an der Arbeitsstelle zur Verfügung stehen. Deshalb ist in einem weiteren Modellierungsschritt die Logistik auf der Baustelle noch zu ergänzen. Somit können die Anlieferungen zum Geschoss sowie die Zwischenlagerung in den Zimmern oder Fluren erfasst werden.

6 Fazit und Ausblick

Wie einleitend aufgezeigt, kommt im Bauwesen die Fertigungsplanung in der Regel nicht zur Anwendung. Dieser Sachverhalt wird durch die fehlende Systematik bei der Prozessanalyse, die hohe Komplexität der Bauprojekte und den erheblichen Aufwand begründet, der für eine detaillierte Planung der Fertigung notwendig wäre [15]. Hinzu kommt die verbreitete Befürchtung, die Effizienz einer übergeordneten Fertigungsplanung sei aufgrund des begrenzten Einflusses auf die beteiligten Fremdfirmen und deren eigenständige Arbeitsvorbereitung fraglich [18].

Jedoch zeigen Beispiele aus anderen Branchen, dass eine tiefgehende und übergeordnete Fertigungsplanung auch bei Unikatproduktion durchaus sinnvoll ist. Sie macht die Komplexität der Unikatfertigung in der Planungsphase überschaubar und in der Produktion beherrschbar. Durch den unterstützenden Einsatz der Simulation gewinnt die Fertigungsplanung an Robustheit und Glaubwürdigkeit. Des Weiteren werden mit der Simulation unterschiedliche Szenarien untersucht. Auf diese Weise kann aus der Vielfalt der Bauablaufvarianten die geeignetste ausgewählt und die Bauproduktion weitestgehend optimal gestaltet werden. So-

mit stellt die Simulation das wesentliche Werkzeug zur Unterstützung der baulichen Produktion in der Fertigungsplanungs- und Ausführungsphase dar.

Die durchgeführte Simulationsstudie hat aufgezeigt, dass die für eine derartig detaillierte Fertigungsplanung notwendigen Prozessdaten in der Praxis heute nicht vorhanden sind. Eine Erhebung dieser Daten und deren Aufarbeitung für die Zwecke der Simulation ist eine umfangreiche aber enorm wichtige Aufgabe, um die Bauproduktion in den Griff zu bekommen.

Die Erfahrungen aus dem betrachteten Beispielprojekt zeigen den engen Zusammenhang zwischen Montage und Logistik, die in den anderen Branchen schon lange bewusst gesteuert werden. Insbesondere bei der detaillierten Planung sind die Logistikabläufe und deren Einfluss auf die Bauproduktion nicht zu unterschätzen. Deshalb müssen auch die Abläufe in der Bauproduktion im Rahmen der Fertigungsplanung genauso detailliert betrachtet werden, wie die der Bauproduktion. Dieser Tatsache soll Rechnung getragen werden, indem eine umfangreiche Logistiksimulation auf das beschriebene Beispielprojekt angewendet wird.

Hierbei müssen die Ver- und Entsorgung der Arbeitsplätze mit Material und Produktionsmitteln sowie die dynamische Kapazität, Lage, Zugänglichkeit und Verfügbarkeit der Lagerflächen berücksichtigt werden. Ebenso sollen Art, Kapazität und Auslastung der Materialflussmittel Eingang in die Logistiksimulation finden [4].

In diesem Artikel wurde gezeigt, dass die technischen Möglichkeiten zur baulichen Simulation durchaus vorliegen und auch die Notwendigkeit offensichtlich ist. Es stellt sich also die Frage, warum dieses mächtige Werkzeug im täglichen Gebrauch der Arbeitsvorbereitung noch immer keine Anwendung findet. Diese Frage müssen sich die Verantwortlichen in den Bauunternehmen stellen.

Wie lange kann die Bauwirtschaft auf diesen Fortschritt verzichten?

Literatur

- [1] Berner, F., Váth, C. (2011): Der Grundstein der Kostensicherheit – Baubetrieb als Basis für die Erstellung von Leistungsverzeichnissen. In: Jehle, P. (Hrsg.): Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach, Dresden: A-Z Druck, S. 22.
- [2] Kochkine, V. (2012): Fertigungsplanung als Erfolgsfaktor der baulichen Produktion. In: Brunk, M. F., Osebold, R. (Hrsg.): Fortschritt-Berichte VDI Reihe 4 Nr. 218, S. 25–34, 23. Assistententreffen der Bereiche VDI Aachen University, 18.-20. Juli 2012, Düsseldorf: VDI Verlag, S. 25–34.
- [3] Berner, F. (1983): Verlustquellenforschung im Ingenieurbau, Dissertation, Institut für Baubetriebslehre, Universität Stuttgart, S. 13.

- [4] *Krauß, S.* (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung. In: *Berner, F.* (Hrsg.): Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart – Band 45, Berlin: Bauwerk-Verlag.
- [5] *Wenzel, S.* (2009): Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik – Stand und Perspektiven. In: *Elst, G.* (Hrsg.): Tagungsband zum ASIM-Treffen STS/GMMS, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 7–16.
- [6] *Böhnlein, C.-B.* (2004): Simulation in der Bauwirtschaft. 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, Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, S. 1–22.
- [7] VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1 (2000): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen. VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck, Beuth: Berlin.
- [8] *Spieckermann, S.* (2011): Simulation von Unikatprozessen aus Sicht eines Spezialisten für Simulationsdienstleistungen. In: *Schach, R.* (Hrsg.): Tagungsband des 1. BBB-Kongresses, Dresden, S. 141–151.
- [9] *Steinhauer, D.* (2006): Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Wertplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft. In: *Wenzel, S.* (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung, San Diego: SCS Publishing House e.V., S. 1–14.
- [10] *Steinhauer, D.* (2008): Planung komplexer Montageabläufe mit Hilfe der constraint-basierten Simulation. In: *Rabe, M.* (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 81–89.
- [11] *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. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 171–178.
- [12] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (1985) Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 2, 4. Auflage. München: Hanser.
- [13] *Girmscheid, G., Kersting, M.* (2011): Rational schalen. In: Bauingenieur, 02/2011, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, S. 51.
- [14] *Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S.* (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Berlin: Springer-Verlag.
- [15] *Franz, V.* (1999): Simulation von Bauwerken mit Hilfe von Perti-Netzen. In: *Hohmann, G.* (Hrsg.): Fontiers in Simulation. Tagungsband zum 13. Symposium Simulationstechnik. Ghent: SCS European Publishing House.
- [16] *Kugler, M., Franz, V.* (2008): Einsatz von Simulation zur Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen im Bauwesen. In: *Rabe, M.* (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistic Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 151–160.
- [17] *König, M., Beißert, U., Steinhauer, D., Bargstädt, H.-J.* (2007): Constraint-based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. In: 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation, CD-ROM Publikation.
- [18] *Mikulakova, E., König, M., Tauscher, E., Beucke, K.* (2010): Knowledge-based schedule generation and evaluation. In: Advanced Engineering Informatics, 24/2010, Elsevier, S. 389–403.