

Ansatz zur simultanen Durchführung statistischer Versuchspläne mittels farbiger Petri-Netze zur Simulation von Bauprozessen im Hochbau

Approach for the simultaneous execution of statistical experiments using coloured Petri nets in building construction simulation

Kais Samkari, Volkhard Franz, Universität Kassel, Kassel (Germany),
ksamkari@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

Abstract: Analysing building construction processes using simulation requires the investigation of a large number of systematic simulation runs in order to understand the dynamic behaviour of the system. This thorough analysis using simulation, however, is computationally expensive, and thus a computationally efficient model is required. In this paper, a Petri net-based approach to simultaneous, discrete event simulation is proposed. This approach associates each of the simulation runs of an experiment with a colour, so that it allows the simultaneous execution of the simulation runs using one mutual coloured Petri net on the same computer. After describing the simulation concept of this approach, the paper depicts a computational analysis and indicates that a computational saving can be achieved by generating one mutual coloured Petri net for the simulation runs of the experiment.

1 Einleitung

Die effiziente Ausführung eines Bauprojekts im Hochbau setzt in der Arbeitsvorbereitung die Erstellung eines wirtschaftlich optimierten Terminplans voraus. Eine der Herausforderungen der Baeterminplanung ist der Unikatcharakter eines Gebäudes, der eine projektspezifische Betrachtung in der Planungs- und Ausführungsphase erfordert. Bauprozesse, die in der Regel eine Vielzahl von Bautätigkeiten aufweisen, können somit nicht im Voraus geplant werden. Außerdem existieren zwischen den einzelnen Tätigkeiten sogenannte Abhängigkeitsbeziehungen, d. h., bestimmte Arbeiten müssen erledigt sein, bevor andere Tätigkeiten beginnen können. Diese Voraussetzungen geben die technischen Abhängigkeiten und organisatorischen Anordnungen zwischen den Bautätigkeiten auf der Prozessebene an. Darüber hinaus verfügen die zur Ausführung der Bauaktivitäten erforderlichen Arbeitskräfte und Betriebsmittel nur über begrenzte Kapazitäten, die auf der Baustelle dynamisch variieren. Ohne die entsprechende Verfügbarkeit der Betriebsressourcen werden die Baumaßnahmen sequenziell

ausgeführt, obwohl sie bei ausreichender Anzahl gleichzeitig ausgeführt werden könnten.

Weiterhin zeigt die Baupraxis zum einen, dass Änderungen und neue Anforderungen an das Bauwerk den Baubetrieb stets begleiten und zu beachtlichen Abweichungen vom geplanten Bauablauf führen können. Zum anderen wird der Terminplanung sowohl in der Arbeitsvorbereitungs- als auch in der Ausführungsphase nicht genügend Zeit gegeben. Infolgedessen stehen die verantwortlichen Ingenieure bei der Entscheidung über den Produktionsverlauf der Baumaßnahme unter hohem Zeitdruck. Die Erstellung eines wirtschaftlich optimierten Terminplans, in dem die zur Verfügung stehenden, knappen Ressourcen auf effektive Weise genutzt werden, ist somit nicht unproblematisch. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz der Simulation zur Analyse des Verhaltens von dynamischen Unikatprozessen in der Arbeitsvorbereitung ein wesentlicher Aspekt.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die Simulation gehört zum Bereich „Operations Research“ und gilt als ein Analysewerkzeug, um die dynamischen Prozesse eines Systems besser nachvollziehen zu können. Bei der linearen Optimierung des Operations Research handelt es sich um die Suche nach einer optimalen Lösung, in der die Werte bestimmter Modellparameter so gestaltet werden, dass die linearen Zielgrößen eines Systems unter bestimmten, linearen Bedingungen maximiert oder minimiert werden. Bei der Simulation hingegen werden Hypothesen durch verschiedene, stochastische Simulationsexperimente unter bestimmten, nichtlinearen Bedingungen erzielt. Aufgrund der vielfältigen Hypothesen können bei der Simulation realitätsnahe Aussagen über das Verhalten des als System betrachteten Bauprojekts gewonnen werden, die der Entscheidungsfindung eines Bauunternehmens bezüglich der Terminplanung dienen sollen.

In den meisten Ansätzen zur Simulation im Bauwesen wird vorrangig die Modellierung von Bauprozessen betrachtet (Schopbach 2001, Chahrour 2006, Rueppel et al. 2004, König und Beißert 2008, AbouRizk und Hague 2009, Enge und Huhnt 2010, Scherer und Ismail 2011, Kugler 2012). Ziel dieser Ansätze ist die Reduzierung des Aufwands bei der Erstellung des Simulationsmodells und der Festlegung der erforderlichen Parameter. Beispielhaft zu nennen sind der Ansatz zur Wiederverwendung einmal angelegter Prozessvorlagen, das constraint-basierte Modellierungskonzept und der Ansatz zur Integration einer Modellierungsumgebung in einem CAD-System.

Bei der Simulation komplexer Systeme ist eine effiziente Versuchsplanung erforderlich. Hierbei ist eine einfache Vorgehensweise, in der sich der Simulationsanwender bei der Variation der Parameter von seiner Intuition leiten lässt, in der Regel ungeeignet (VDI 3633 - Blatt 3 1997, S. 5). Sanchez und Wan (2012) weisen darauf hin, dass viele komplexe Simulationsmodelle mit einer unsystematischen Vorgehensweise erforscht werden. Trotzdem ist festzuhalten, dass die in der vorhandenen Literatur betrachteten Simulationsmodelle parametrisierbar sind und die Untersuchung verschiedener Kombinationen der einzelnen Modellparameter ermöglichen.

3 Problembeschreibung und Aufbau des Beitrags

Im Gegensatz zur Modellierung von Simulationsmodellen steht das Thema der statistischen Versuchsplanung und Auswertung bei der Simulation von Bauprozessen im Hochbau noch nicht im Fokus der Forschung. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit diesem Thema und stellt eine systematische Vorgehensweise vor, mit der das mehrfache Erstellen eines Simulationsmodells für verschiedene Simulationsläufe eines Versuchsplans eingespart werden kann.

Das eingesetzte Personal zur Untersuchung eines Versuchsplans verursacht nicht unerhebliche Kosten. Der Versuchsaufwand wird mathematisch in der Form m^k ausgedrückt und bedeutet, dass k Faktoren des Modells auf m Stufen untersucht werden sollen. Zum Beispiel ergeben sich bei vier Faktoren auf vier Stufen 256 Simulationsläufe, die unterschiedliche Ergebnisse liefern könnten. Im Prinzip sollen alle Simulationsläufe untersucht werden, um das Verhalten des Systems unter bestimmten Bedingungen besser einschätzen zu können. Jedoch wird der Aufgabe der Analyse mittels Simulation weder in der Arbeitsvorbereitungs- noch in der Ausführungsphase genügend Zeit gegeben, wodurch viele Simulationsläufe vernachlässigt werden.

Um die Rechenzeit zur Durchführung eines Versuchsplans, d. h. die Erstellung sowie die Ausführung eines Versuchsplans, zu reduzieren, können verschiedene Simulationsläufe simultan durchgeführt werden. In der Literatur wurden Ansätze zur Umsetzung einer simultanen Vorgehensweise bei der Simulation beispielhaft auf Basis der Zeitdilatation (Schruben 1997) und eines Entscheidungsbaums (Mejtsky 2007) vorgestellt. In diesem Beitrag werden verschiedene Simulationsläufe eines diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells simultan mittels eines farbigen Petri-Netzes durchgeführt. Jeder Simulationslauf des Versuchsplans wird dabei als Petri-Netz abgebildet. Kapitel 4 beschreibt zunächst den Aufbau eines Petri-Netzes. In Kapitel 5 wird eine Analyse der Rechenzeit zur Durchführung des Versuchsplans sowohl theoretisch als auch praktisch anhand eines Bauprojekts durchgeführt. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

4 Simultanes, Petri-Netz-basiertes Simulationskonzept

Der Forschungsansatz in diesem Beitrag verwendet ein Petri-Netz-basiertes Simulationsmodell (Samkari et al. 2012b). Petri-Netze eignen sich besonders für die Modellierung und Analyse der fundamentalen Phänomene der Nebenläufigkeit von Bauprojekten (Franz 1989). Das Petri-Netz kann automatisch aus den Produkt- und Prozessdaten erstellt werden, die anhand des Plug-ins „CiSmo (CAD-integrierte Simulationsmodellierung)“ erfasst werden (Kugler 2012). CiSmo erfasst die Produktdaten aus der CAD-Zeichnung des Gebäudes, wobei die Prozessdaten über das CiSmo-Menü-System eingegeben werden. Das automatisch erstellte Petri-Netz hat eine konfliktfreie Struktur, d. h., jede Stelle hat eine einzelne Eingangs- und Ausgangskante. Vor der Simulation findet eine Verifizierungs- und Validierungsanalyse statt (Samkari und Franz 2012a). Bei dieser Analyse werden Syntax- und Bedeutungsfehler der Netzstruktur erkannt und beseitigt. Dies wirkt sich durch eine höhere Genauigkeit der Simulationsergebnisse aus.

4.1 Zuordnung eines Bauvorgangs zum Petri-Netz

Ein Bauvorgang im CiSmo-Prozessmodell ist einem konkreten Bauteiltyp, einem Ergebnis und einem zeitlichen Aufwandswert, basierend auf den maßgebenden Betriebsressourcen, zugeordnet. Jeder Bauvorgang kann mit den Ergebnissen anderer Bauvorgänge durch das Festlegen von Abhängigkeitsbeziehungen verknüpft werden. Damit können die Abhängigkeitsbeziehungen und die Fertigungsrichtung zwischen den Vorgängen exakt beschrieben werden. Tabelle 1 zeigt beispielhaft drei Bauvorgänge aus den vorhandenen Prozessdaten eines Bauprojekts.

Tabelle 1: Drei Bauvorgänge aus den Prozessdaten eines Bauprojekts in Bezug zu den Bauteiltypen, Ergebnissen und ihren Abhängigkeitsbeziehungen

| Bauvorgang | Bauteiltyp | Ergebnis | Abhängigkeitsbeziehungen | Fertigungsrichtung |
|------------------------|-------------|--------------------------|--|--|
| Bodenplatte herstellen | Bodenplatte | hergestellte Bodenplatte | - | Dieser Bauabschnitt, dieses Geschoss |
| STB-30-Wand herstellen | STB-30-Wand | hergestellte STB-30-Wand | hergestellte Bodenplatte in diesem Geschoss, in allen Bauabschnitten, hergestellte Decke in vorherigem Geschoss, in allen Bauabschnitten | Dieser Bauabschnitt, dieses Geschoss |
| Decke herstellen | Decke | hergestellte Decke | hergestellte STB-30-Wand in diesem Geschoss, in allen Bauabschnitten | Vorheriger Bauabschnitt, dieses Geschoss |

Jeder definierte Vorgang wird für alle Bauteile des Bauteiltyps, dem der Vorgang zugewiesen ist, in allen Bauabschnitten und Geschossen des Gebäudes durchgeführt. Die exakte Dauer des Vorgangs in einem bestimmten Bauabschnitt/Geschoss ist vor der Simulation nicht vorgegeben. Die Vorgangsdauer wird anhand der Menge der entsprechenden Bauteile, des zugeordneten Aufwandswerts und den zum Betrachtungszeitraum verfügbaren Ressourcen während der Simulation festgelegt. Das führt einerseits zur Untersuchung verschiedener Strategien bei der Ressourcenaufteilung, andererseits können die Kosten- und Zeitriskiken verschiedener Bauterminpläne mittels Simulation hervorgehoben werden.

Ein Bauvorgang, der in einem bestimmten Geschoss und Abschnitt des Gebäudes ausgeführt werden soll, ist im Petri-Netz mit einer Transition, einer Stelle und einer Kante abgebildet (Abb. 1). Die Transition repräsentiert den Bauvorgang selbst, während die Stelle den Systemzustand nach der Ausführung des Vorgangs darstellt. Beim Schalten der Transition wird eine Marke erzeugt, die durch die Kante fließt und dann in der Stelle abgelagert wird. Zusätzliche Kanten verknüpfen die Teilelemente des Netzes. Diese Kanten ermöglichen das Entfernen der Marken und bilden die technologischen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Bauvorgängen und deren Fertigungsrichtungen ab. Zusätzliche Transitionen zur Darstellung der Synchronisation der nebenläufigen Bauvorgänge werden ebenfalls erstellt.

Die Ressourcenbedürfnisse einzelner Bauvorgänge werden nicht in der Struktur des Netzes als extra Stellen und Kanten, sondern in der Guard-Funktion der entsprechenden Transitionen modelliert. Die Ressourcenmodellierung ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Der Detaillierungsgrad eines Modells, das prinzipiell eine vereinfachte Nachbildung der Realität ist, hängt von dem zu lösenden Problembereich ab. Das vorgestellte Modell des Petri-Netzes ist für die Erkennung von Terminüberschneidungen zwischen verschiedenen Bauaktivitäten ausreichend und ermöglicht die deterministische sowie stochastische Simulation der Bauprozesse. Allerdings fehlen den Standardelementen des Petri-Netz-Modells die kontextbezogenen Eigenschaften (z. B. die Menge der Bauteile in einem bestimmten Bauabschnitt/Geschoss und der zeitliche Aufwandswert eines Vorgangs), die zu sinnvollen Ergebnissen bei der Simulation führen. Deshalb sind den Elementen des Netzes Stereotypen zugeordnet, mit denen den Elementen weitere Daten zugewiesen werden können.

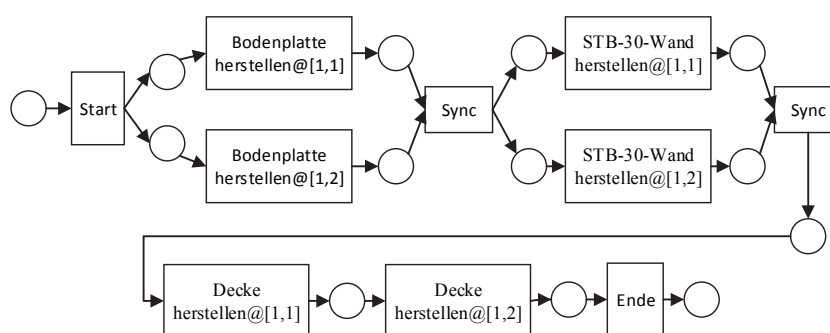


Abbildung 1: Die in Tabelle 1 genannten Bauvorgängen für ein Geschoss und zwei Bauabschnitte, dargestellt als Petri-Netz

Eine Steuerungskomponente führt das Petri-Netz aus. Während der Simulation, d. h. die Ausführung des Netzes, repräsentieren die Marken den Istzustand des Systems. Die Marken werden von der Steuerungskomponente geregelt. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente die in den Prozessdaten definierten Betriebsressourcen zugeordnet. Während der Simulation ist die Steuerungskomponente dafür verantwortlich, die Ressourcenkonflikte zwischen mehreren ausführbaren Vorgängen zu lösen. Ein Simulationslauf startet mit einer Marke in der Startstelle des Netzes und endet, sobald eine Marke in der Endstelle des Netzes abgelegt wird.

4.2 Zuordnung eines Versuchsplans zum Simulationsmodell

Die Parameterliste der zu untersuchenden Einflussgrößen eines Prozessmodells enthält:

- die Anzahl der verschiedenen Ressourcen (Fachkräfte, Betriebsmittel und -Geräte),
- die Bauverfahren, ihre Bauvorgänge und die entsprechenden technologischen Abhängigkeitsbeziehungen sowie
- die Anordnungsbeziehungen zwischen den Bauvorgängen.

Die Kombination der möglichen Einstellungen aller Modellparameter ergibt einen Versuchsplan, der aus einer Reihe von Petri-Netzen besteht. Jedes Petri-Netz entspricht einem Simulationslauf (Abb. 2, links).

Bei manchen Simulationsläufen des Versuchsplans wird nur die Anzahl der Ressourcen verändert. Dadurch bleibt die Struktur des Netzes gleich, da die Bauvorgänge und ihre Abhängigkeitsbeziehungen nicht verändert werden. Wenn sich nur die Marken der Simulationsläufe unterscheiden und differenziert zu betrachten sind, können diese Simulationsläufe simultan im gleichen Petri-Netz durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird das Konzept der Markenfarben eingeführt.

Jedem Simulationslauf ist eine Markenfarbe als Kennzeichnung zugeordnet. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente nun die definierten Betriebsressourcen eines Simulationslaufs unter einer spezifischen Farbe zugeordnet. Anhand dieser Farben kann die „stateless“ Steuerungskomponente, die keine Zustandsinformationen speichert, die verschiedenen Simulationsläufe unterscheiden (Abb. 2, rechts).

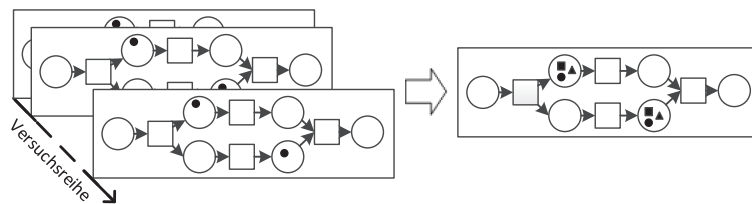


Abbildung 2: Versuchsreihe, dargestellt durch Layers von Petri-Netzen (links). Die gleiche Versuchsreihe, dargestellt durch ein farbiges Petri-Netz (rechts)

Ändert sich in anderen Simulationsläufen des Versuchsplans nicht nur die Anzahl der Ressourcen, sondern auch der Bauvorgang selbst einschließlich der Abhängigkeits- und Anordnungsbeziehungen, so ändert dies einen Teil der Netzstruktur (Abb. 3, links). Dennoch kann aus allen möglichen Petri-Netzen der verschiedenen Simulationsläufe ein einziges übergeordnetes Netz aufgebaut werden.

Jeder Kante ist eine Menge von Netznummern zugeordnet. Jede Netznummer zeigt an, zu welchem ursprünglichen Netz eine Kante gehört. Gleichzeitig ist jedem Simulationslauf eine entsprechende Netznummer zugeordnet, die auf die Nummer seines ursprünglichen Netzes hinweist. Diese zusätzlichen netzbezogenen Kennzeichnungen können ebenfalls als Farben betrachtet werden. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente demzufolge nicht nur die Ressourcen, sondern auch die Netznummer eines Simulationslaufs unter einer spezifischen Farbe zugeordnet. Dadurch kann die Steuerungskomponente weiterhin die verschiedenen Simulationsläufe mit ihren verschiedenen Parametereinstellungen unterscheiden (Abb. 3, rechts).

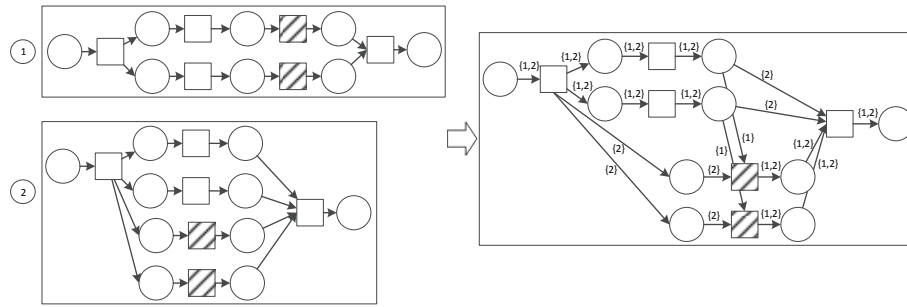


Abbildung 3: Zwei Versuche mit zwei verschiedenen Anordnungsbeziehungen (links). Ein übergeordnetes Netz, das aus den beiden Petri-Netzen aufgebaut ist (rechts)

Wie oben schon beschrieben wird ein Simulationslauf des Versuchsplans von einer Markenfarbe abgebildet. Die Anzahl der Markenfarben ist gleich der Anzahl der Simulationsläufe des Versuchsplans. Ein einzelnes, farbiges Petri-Netz ermöglicht den Durchlauf einer beliebigen Anzahl von Markenfarben (Abb. 4). Damit können alle Simulationsläufe eines Versuchsplans simultan durchgeführt werden.

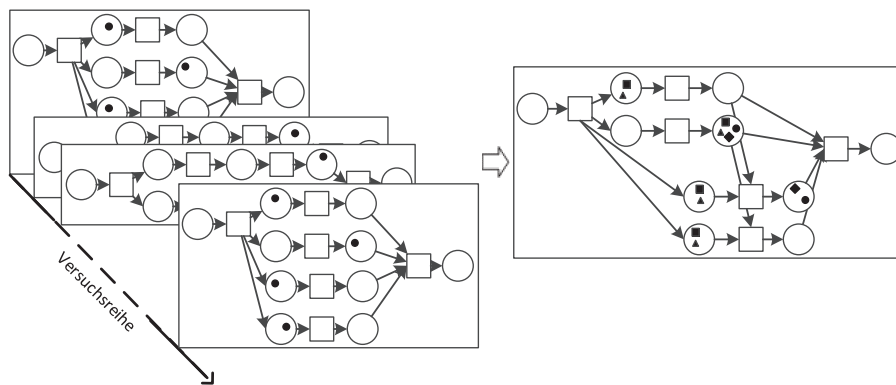


Abbildung 4: Versuchsreihe, dargestellt durch Layers von verschiedenen Petri-Netzen (links). Die gleiche Versuchsreihe, dargestellt durch ein übergeordnetes farbiges Petri-Netz (rechts)

Der beschriebene Ansatz zur simultanen Durchführung eines Experiments bedient sich der farbigen Petri-Netze. Damit lässt sich dieses Ansatzes nur bei einer Petri-Netz-basierten Terminplanung anwenden.

5 Analyse der Rechenzeit des vorgestellten Ansatzes

5.1 Aus theoretischer Sicht

Die Rechenzeit (R_{seq}) zur Erstellung und Ausführung des ganzen Versuchsplans ergibt sich bei einer sequenziellen Versuchsdurchführung zum einen aus der Anzahl

der Simulationsläufe (n) und zum anderen aus der Rechenzeit zur Erstellung (E_i) und Ausführung (A_i) jedes einzelnen Simulationslaufs (s. Gl. 1).

$$R_{seq} = \sum_{i=1}^n (E_i + A_i) \quad (1)$$

Bei der simultanen Vorgehensweise wird die Rechenzeit (R_{sim}) zur Erstellung des übergeordneten Netzes als (E') bezeichnet. Da die Alternativen des Systems eine strukturelle Ähnlichkeit aufweisen, werden zahlreiche Elemente des Petri-Netzes nicht neu erstellt. Bei der Erstellung der Alternativen, die durch die Veränderung der Anzahl der Ressourcen bedingt sind, werden die $(n - 1)$ -mal Rechenzeiten zur Erstellung des gleichen Netzes erspart. Ändert sich ein Teil des Netzes aufgrund der Änderung der Bauvorgänge einschließlich deren Abhängigkeitsbeziehungen und Fertigungsrichtungen, werden die Rechenzeiten zur Erstellung der gleichen Elemente des Petri-Netzes eingespart. Demzufolge wird sich die Rechenzeit zur Erstellung des ganzen Versuchsplans reduzieren.

Die Anzahl der zu simulierenden Ereignisse bei einer simultanen Vorgehensweise ist gleich der Anzahl der Ereignisse bei einer sequenziellen Vorgehensweise. Deshalb entspricht auch die Rechenzeit zur Ausführung eines simultanen Versuchsplans dem zeitlichen Aufwand bei einer sequenziellen Vorgehensweise. Allerdings ist hier der Aufwand zusätzlicher Operationen (O') zur Erkennung und Trennung der Simulationsläufe anhand einzelner Farben zu berücksichtigen.

Die Rechenzeit zur Erstellung und Ausführung des ganzen Versuchsplans wird bei einer simultanen Versuchsdurchführung wie folgt berechnet (s. Gl. 2):

$$R_{sim} = E' + \sum_{i=1}^n A_i + O' \quad (2)$$

Eine mögliche Einsparung der Rechenzeit kann sich aus der strukturellen Ähnlichkeit der Systemalternativen ergeben. Diese Einsparung in der Rechenzeit hängt stark von den verschiedenen Eingaben der Modellparameter bzw. von den Prozessdaten ab. Dennoch ist bei diesem Ansatz davon auszugehen, dass die Herangehensweise der Anwender bei der Festlegung der Bauvorgänge und deren technologischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen rational bzw. realitätsnah ist.

5.2 Aus praktischer Sicht

Der vorgestellte Simulationsansatz wurde bereits bei einem viergeschossigen Gebäude eingesetzt. Das Bauwerk untergliedert sich in insgesamt vier Bauabschnitte. Das Gebäudemodell ist in AutoCAD Architecture gezeichnet und enthält Objekte von 24 verschiedenen Bauteiltypen, die einer Menge von 60 Bauvorgängen in den Prozessdaten zugeordnet sind. Die Bauvorgänge sind den Gewerken Mauerarbeiten, Beton- und Stahlbetonarbeiten und Stahlbauarbeiten zugeordnet. Die Verfügbarkeit des zugehörigen Personals auf der Baustelle bestimmt die Dauer der Bauvorgänge. Das aus den Produkt- und Prozessdaten generierte Petri-Netz enthält insgesamt 599 Transitionen, davon 462 Bauvorgänge, die in den verschiedenen Bauabschnitten und Geschossen des Gebäudes

durchgeführt werden sollen. Für die Simulation wurde angenommen, dass sowohl die Betriebsmittel als auch die Baumaterialien unbegrenzt verfügbar sind. Für jedes Gewerk wurden zwei Arbeitsgruppen definiert. Die Prozessdaten wurden über CiSmo in der CAD-Umgebung eingegeben und stammen aus dem realen Bauablaufplan des Bauprojekts. Die Bauprozesse werden mit der Simulationsumgebung „Modeling Objects & Simulation Agents in Construction Management“ (MOSAICA) ausgeführt (Samkari et al. 2012b). MOSAICA realisiert den vorgestellten Ansatz und ermöglicht die sequenzielle sowie die simultane Durchführung verschiedener, Petri-Netz-basierter Simulationsläufe.

Eine Menge von 100 verschiedenen Alternativen, bedingt durch die Veränderung der Arbeitsgruppengröße der Fachkräfte wurde sequenziell und simultan jeweils 5-mal durchgeführt. Die Untersuchung bei der sequenziellen Vorgehensweise besteht aus 100 Versuchsplänen jeweils mit einem Simulationslauf, wobei die Untersuchung bei der simultanen Vorgehensweise aus einem Versuchsplan mit 100 Simulationsläufen besteht. Anhand einer in MOSAICA integrierten Zeitmessungskomponente wurden die Zeiten der Erstellung des Versuchsplans sowie der Ausführung des Versuchsplans aufgenommen.

Die Rechenzeit zur Erstellung des Versuchsplans (E') betrug basierend auf den Untersuchungsbedingungen im Durchschnitt drei Sekunden und ist damit im Vergleich zur Erstellung bei einer sequenziellen Vorgehensweise mit einer Durchlaufzeit von 65 Sekunden um 95 % reduziert worden. Die Rechenzeit zur Ausführung eines Versuchsplans betrug ungefähr eine halbe Sekunde und ist ungefähr 10 % aufwendiger als die nacheinander durchgeführten Simulationsläufe, die insgesamt 0,4 Sekunden gebraucht haben. Dieser Prozentsatz stellt die Rechenzeit zusätzlicher Operationen (O') zur Erkennung und Trennung der einzelnen Simulationsläufe dar.

Das gleiche Bauprojekt, d. h. die gleichen Produkt- und Prozessdaten, wurden von Kugler (2012) unter den gleichen Bedingungen anhand von 10 Simulationsexperimenten in einer zeitgesteuerten Simulationsumgebung durchgeführt. Die Laufzeit eines einzelnen Simulationslaufs betrug durchschnittlich 9,7 Minuten (ohne Animation).

5.3 Diskussion der Rechenzeit

Bei der Simulation im Hochbau ist eine Zeiteffizienz zur Durchführung eines Versuchsplans entscheidend. Sie erlaubt zum einen die Berücksichtigung noch umfangreicherer Modelle in Bezug auf die Anzahl der Modellparameter und die Anzahl der im Gebäudemodell enthaltenen Bauobjekte. Zum anderen ermöglicht die Zeiteffizienz die Untersuchung noch mehrerer Planungsvarianten, wodurch ein noch größerer Teil des Suchraums der Simulationsstudie binnen der kurzen, zur Verfügung stehenden Zeit der Systemanalyse mittels Simulation abgedeckt wird.

Jede mögliche Rechenzeiterparnis wirkt als positiver Effekt auf dem Arbeitsablauf, wenn die gleichen Simulationsergebnisse erreicht werden. Die dargestellte Untersuchung zeigt, dass die Rechenzeit der Simulationsdurchführung durch die simultane Durchführung des Versuchsplans reduziert werden kann, da eine Ersparnis der Rechenzeit zur Erstellung des ganzen Versuchsplans erreicht wird. Zudem zeigt die Untersuchung, dass die Steigerung der Zeiteffizienz grundsätzlich bei der Entwicklung des Simulationsmodells berücksichtigt werden sollte.

Außerdem weist die Untersuchung darauf hin, dass sich die ereignisgesteuerte Simulation im Allgemeinen und die ereignisgesteuerte Simulation mittels eines farbigen Petri-Netz-Modells im Besonderen für die Analyse von Bauprozessen im Hochbau hinsichtlich der effizienten Durchführung des Versuchsplans besser als die zeitgesteuerte Simulation eignet. Da bei der Petri-Netz-basierten Simulation nur diejenigen Transitionen betrachtet werden, deren Eingangsstellen mit einer Marke belegt sind, kann eine relativ hohe Ersparnis der Rechenzeit bei der Ausführung des Versuchsplans erzielt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neuer Simulationsansatz zur simultanen Durchführung eines Versuchsplans vorgestellt, indem ein Versuchsplan mit einem einzelnen, farbigen Petri-Netz abgebildet wurde. Ziel des Ansatzes ist die effiziente Durchführung eines Simulationsexperiments im Hochbau. Mithilfe dieser Möglichkeit kann die Anwendung der Simulation in der Arbeitsvorbereitung im Hochbau weite Verbreitung in der Baupraxis erlangen. Die Erstellung des Petri-Netzes aus den Produkt- und Prozessdaten sowie die Gruppierung aller Netze in einem übergeordneten Netz wurden detailliert beschrieben. Enthalten die Systemalternativen eine strukturelle Ähnlichkeit, wird eine erhebliche Einsparung der Rechenzeit zur Erstellung des Versuchsplans erzielt. Dies zeigten die Ergebnisse des praktischen Einsatzes des vorgestellten Ansatzes bei einem viergeschossigen Gebäude innerhalb der diskreten, ereignisgesteuerten Simulationsumgebung MOSAICA.

Weitergehende Arbeitsschritte können der Untersuchung vorhandener Simulationsmodelle und -ansätze im Hochbau hinsichtlich der nicht-funktionalen Anforderungen, wie z. B. die Flexibilität der Bauprozessmodellierung und die intuitive Interpretation der Simulationsergebnisse, dienen.

Literatur

- AbouRizk, S.M.; Hague, S.: An overview of the COSYE environment for construction simulation. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin (USA), 13.-16. December 2009, S. 2624-2634.
- Chahrour, R.: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Kassel, kassel university press 2006.
- Enge, F.; Huhnt, W.: Muster in Prozessen der Bauablaufplanung - Ein Branch-and-Bound-Verfahren zur Mustererkennung in Planungs- und Ausführungsprozessen. In: Huhnt, W. (Hrsg.): Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin (6), 2010.
- Franz, V.: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen. Kassel, Gesamthochschule Kassel 1989.
- König, M.; Beißert, U.: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen. In: Bargstädt, H.J. (Hrsg.): Tag des Baubetriebs 2008 - Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau - Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, 31. März 2008, S. 17-36.

- Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel, kassel university press 2012.
- Mejtsky, G. J.: A metaheuristic algorithm for simultaneous simulation optimization and applications to traveling salesman and job shop scheduling with due dates. In: Henderson, S.G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J. D.; Barton, R. R. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, DC (USA), 09.-12. December 2007, S. 1835-1843.
- Rueppel, U.; Meissner, U.F.; Greb, S.: A Petri Net based Method for Distributed Process Modelling in Structural Engineering. In: Bargstädt, H.J.; Blickling, A. (Hrsg.): Proceedings of the Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), Weimar (Germany), 02.-04. June 2004.
- Samkari, K.; Franz, V. (2012a) A Petri net based method for the early verification & validation of a simulation study in construction management. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, S. 344:1-344:2.
- Samkari, K.; Kugler, M.; Kordi, B.; Franz, V. (2012b) Colored Petri-net and Multi-Agents: A Combination for a Time-efficient Evaluation of a Simulation Study in Construction Management. In: Issa, R.R.; Flood, I. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, Florida (USA), 17.-20. June 2012, S. 153-160.
- Sanchez, S. M.; Wan, H.: Work smarter, not harder: A tutorial on designing and conducting simulation experiments. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, S. 170:1-170:15.
- Scherer, R.; Ismail, A.: Process-based simulation library for construction project planning. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, K.P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), Arizona (USA), 11.-14. December 2011, S. 3493-3504.
- Schopbach, H.: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden. Kassel, kassel university press 2001.
- Schruben, L. W.: Simulation optimization using simultaneous replications and event time dilation. In: Andradóttir, S.; Healy, K.J.; Withers, D.H.; Nelson, B.L. (Hrsg.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta (USA), 07.-10. December 1997, S. 177-180.
- VDI 3633 - Blatt 3 (1997). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Experimentplanung und -auswertung, Blatt 3, Richtlinie, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik, VDI 3633, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997.