

Modellierung und Simulation unscharfer baulogistischer Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie

Modeling and simulation of uncertain construction logistics data using fuzzy set theory

Kamil Szczesny, Markus König, Ruhr-Universität Bochum, Bochum (Germany),
kamil.szczesny@rub.de, koenig@inf.bi.rub.de

Lars Laußat, Manfred Helmus, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal
(Germany), laussat@uni-wuppertal.de, helmus@uni-wuppertal.de

Abstract: In this paper a concept to model, integrate and assess uncertain real-time logistics data using discrete-event simulation is presented. The logistics data cover information about availability of resources and material delivery dates. These data implicitly imply different types of uncertainties due to infrequent data acquisition, varying transport times, or manual assumptions. In this paper the fuzzy set theory is applied to model these inherent uncertainties. Subsequently, the uncertain real-time logistics data are integrated into a discrete-event simulation model for assessing their consequences on the target schedule. Therefore, the alpha-cut sampling technique is used to generate discrete model input parameters. The simulation results can be used to modify the target construction schedule according to timeframes, costs and other business conditions. In order to demonstrate and validate the presented approach an elementary example is conducted.

1 Einleitung

Für eine effektive Ausführung und Steuerung von Hochbauprojekten sollten Bauablaufpläne konsistent und schnell an aktuelle Randbedingungen auf der Baustelle angepasst werden. Hierbei spielen baulogistische Informationen, wie beispielsweise aktuelle Liefertermine oder die Verfügbarkeit von Ressourcen, eine wesentliche Rolle. Jedoch ist die Bewertung von aktuellen baulogistischen Informationen bzgl. des geplanten Montageprozesses auf der Baustelle nicht trivial und ein überwiegend manueller, dadurch aufwendiger und fehleranfälliger Vorgang.

Die Verwendung ereignisdiskreter Simulationsmodelle zur Analyse und Planung von Bauprozessen ist eine akzeptierte Technik. Auf Basis von Simulationsmodellen können verschiedene Einflüsse auf den Bauablauf untersucht und bewertet werden. Hierzu müssen die entsprechenden Informationen in den aktuellen Bauablaufplan

bzw. das Simulationsmodell integriert werden, um anschließend Prognosen bzgl. der weiteren Ausführung abgeben zu können. Im Anschluss kann eine Modifikation des Bauablaufs erfolgen, falls die definierten Projektziele auf Grund der Einflüsse nicht mehr eingehalten werden können. Hierbei soll die ursprüngliche Struktur des Ablaufplans möglichst nur minimal verändert werden (vgl. van de Vonder et al. 2007).

Die Erfassung von aktuellen baulogistischen Kenndaten erfolgt heutzutage unter anderem auf Basis von Auto-ID-Techniken. Typische Auto-ID-Techniken sind beispielsweise RFID oder biometrische Verfahren. Diese Techniken können auf Baustellen sowie entlang der Transportwege zur Baustelle eingesetzt werden. Die Erfassung eines Betonfertigteils beim Verlassen des Fertigteilwerks ist eine typische baulogistische Information. Weitere Informationen zum Einsatz von RFID in der Baulogistik können Helmus et al. (2011) entnommen werden. Auf Basis von Auto-ID-Techniken kann jedoch nur bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt sich eine bestimmte Ressource an einem bestimmten Ort befindet. Die aktuellen baulogistischen Informationen werden anschließend manuell für die betroffenen Produktionsprozesse aufbereitet. Dabei müssen inhärente Unsicherheiten berücksichtigt werden, die unter anderem durch unregelmäßige Datenerfassung oder variierende Transportzeiten zustande kommen können. Je größer die Zeitspanne zwischen Erfassung und zugehörigem Prozess oder je länger die Transportkette ist, desto größer kann die Unsicherheit sein. Zur Modellierung von mit Unsicherheiten behafteten Daten bieten sich beispielsweise probabilistische oder Fuzzy-basierte Methoden an.

In diesem Beitrag wird die Modellierung, Integration und Simulation von unsicheren baulogistischen Informationen im Rahmen der Bauablaufplanung unter Verwendung von Fuzzy-basierten Ansätzen vorgestellt. Die mittels Fuzzy-Mengen definierten baulogistischen Kenndaten werden in einen ereignisdiskreten Simulationsansatz integriert und systematisch analysiert. Dadurch wird es möglich, ihren Einfluss auf den Baufortschritt zu analysieren und zu bewerten. Die Anpassung des Bauablaufs infolge der baulogistischen Kenndaten ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

2 Stand der Forschung

In der stationären Fertigungsindustrie wird eine automatisierte Erfassung von Ist-Daten häufig schon vorgenommen. Dafür werden Maschinen sowie Material mit eindeutigen Identifikatoren versehen. Fixe Produktionslinien und detaillierte Produktionspläne, ermöglichen eine einfache Zuweisung von Ist-Kenndaten zu den dazugehörigen Prozessen. In Echtzeit erfasste Ist-Daten können schnell und präzise in Produktionspläne integriert werden, sodass diese stets aktuell gehalten werden (vgl. Hotz et al. 2006; Engelhardt-Nowitzki et al. 2008).

Im Gegensatz dazu, sind im Bereich des Bauwesens erst kürzlich verschiedene Konzepte bezüglich der Erfassung von Ist-Kenndaten mittels Auto-ID-Techniken, insbesondere mit RFID erarbeitet sowie in der Praxis umgesetzt worden. Zur Baustellen-Wareneingangskontrolle von Fertigteilen und Stahlkomponenten für den Brückenbau entwickelten Kim et al. (2009) ein RFID-basiertes Erfassungsportal. In Ren et al. (2011) wird ein RFID-basiertes Controlling-Instrument für den Wareneingang und den Einbau von Rohren vorgestellt. In Helmus et al. (2011) werden verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Informationen zur Material- und Personallogistik und deren Verwaltung mit Hilfe eines RFID-Baulogistikeitstands

dargestellt und bzgl. ihres praktischen Einsatzes bewertet. Allerdings werden in diesen Ansätzen die erfassten bauleistungslogistischen Informationen nicht bzgl. des aktuellsten Bauablaufplans unter Berücksichtigung von möglichen Unsicherheiten bewertet.

Im Bereich der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen existieren verschiedene bauleistungslogistische Forschungsansätze (vgl. AbouRizk und Hague 2009). Hierbei wurden spezielle Simulationsmodelle für unterschiedliche Anwendungsgebiete aufgebaut und zur Analyse von Bauabläufen verwendet. Im Bereich des Tunnelbaus wurden auch schon Konzepte zur Integration von Fuzzy-basierten Expertensystemen für die ereignisdiskrete Simulation vorgestellt (vgl. Shaheen et al. 2009). Hierbei wurden jedoch ausschließlich diskrete Simulationsparameter mittels eines Fuzzy-basierten Inferenzmodells ermittelt. In Kulejewski (2011) wurde untersucht, wie Fuzzy-Mengen für unpräzise formulierte Randbedingungen verwendet werden können. Ein ähnlicher Ansatz wird auch im Rahmen dieses Beitrages unter Berücksichtigung von bauleistungslogistischen Informationen verfolgt. Ein Ansatz für Fuzzy-Mengen-basierte Modellierung von unsicheren Prozessdauern wird in Zhang et al. (2005) vorgestellt. Der Ansatz beschreibt, wie vage, unpräzise und subjektive Annahmen über Prozessdauern in Simulationsmodelle integriert werden können. Eine Berücksichtigung von Logistikprozessen und deren Auswirkung, insbesondere auf Ressourcenverfügbarkeit auf der Baustelle, findet keine Berücksichtigung.

In Vojdani und Rösner (2012) wurde ein auf Grey-Zahlen basierender Ansatz zur Modellierung von Unsicherheiten im Bereich der Leercontainerlogistik vorgeschlagen. Eine Grey-Zahl modelliert ein Intervall, über dessen Zahlenbereich keine Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegen. Es wurde untersucht, wie dieses Konzept für die mathematische Optimierung eingesetzt werden kann. Es wurde jedoch deutlich herausgestellt, dass zur Modellierung von unpräzisen Informationen sich eher Fuzzy-Mengen eignen.

3 Reaktive Bauablaufplanung auf Basis bauleistungslogistischer Ist-Kenndaten

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes „Reaktive Bauablaufplanung auf Basis bauleistungslogistischer Ist-Kenndaten“ werden Konzepte zur automatisierten Aktualisierung und Anpassung von Bauablaufplänen im Hochbau unter Verwendung aktueller bauleistungslogistischer Randbedingungen erforscht. Im Fokus stehen hierbei Informationen über verfügbare und qualifizierte Ressourcen, die mittels des Einsatzes geeigneter Auto-ID-Techniken erfasst werden. Diese erfassten bauleistungslogistischen Informationen sollen systematisch und in Echtzeit aufbereitet und unter den vorherrschenden Unsicherheiten bewertet werden. Anschließend werden die aktuellen bauleistungslogistischen Kenndaten in den Bauablauf integriert, um mögliche Abweichungen von der Planung erkennen und bewerten zu können. Werden relevante Abweichungen von der Planung erkannt, soll die Bauablaufplanung gezielt angepasst werden. Der Soll-Ist-Vergleich und die anschließende Anpassung der Bauablaufplanung erfolgt mit Hilfe von Simulationsmodellen. Das Forschungskonzept zur reaktiven Bauablaufplanung auf Basis bauleistungslogistischer Ist-Kenndaten ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Wesentlichen gliedert sich der Ansatz in vier Arbeitsschritte.

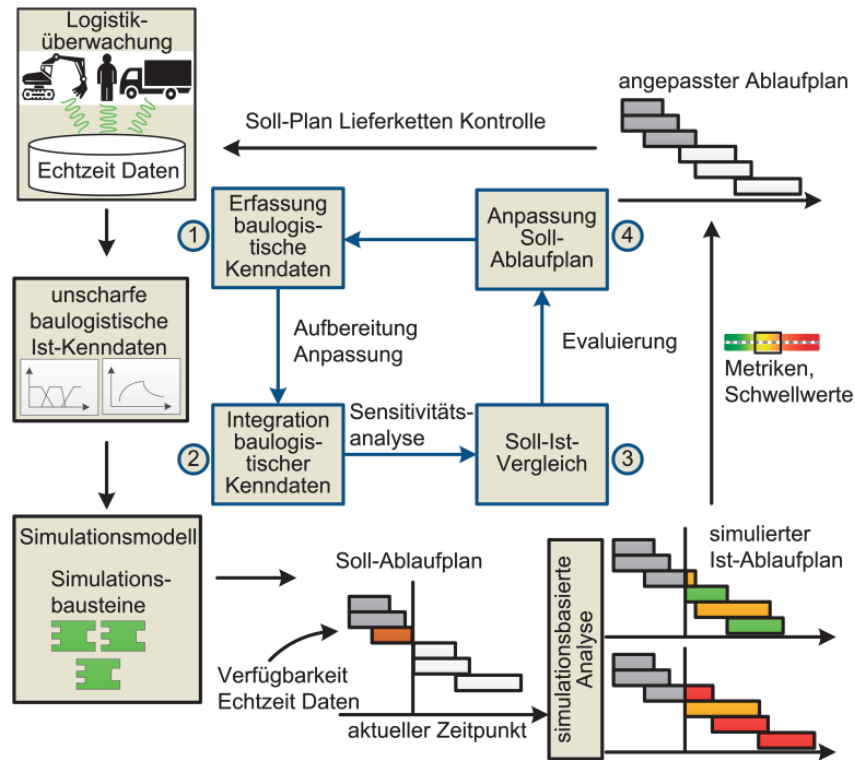


Abbildung 1: Reaktive Bauablaufplanung auf Basis bauleistungsbasierender Ist-Kenndaten

Im ersten Schritt werden aktuelle bauleistungsbasierte Informationen mittels Auto-ID-Techniken automatisiert erfasst. Die erfassten Informationen können in der Regel nicht direkt den jeweiligen Bauprozessen zugeordnet werden. Daher werden zusätzlich manuell festgelegte Annahmen bzgl. Lieferterminen oder dazugehöriger Unsicherheiten berücksichtigt. Erfasste und manuell ergänzte bauleistungsbasierte Informationen führen zu sogenannten bauleistungsbasierten Ist-Kenndaten, die einzelnen Bauprozessen zugeordnet werden können. Im zweiten Schritt werden die aufbereiteten Ist-Kenndaten in ein existierendes Simulationsmodell integriert. Das hier verwendete Simulationsmodell basiert auf dem Konzept der Constraint-basierten Simulation (vgl. König et al. 2007). Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten bzw. unpräzisen Annahmen wird eine Vielzahl von Simulationsexperimenten durchgeführt, um eine Bewertung der Auswirkungen vornehmen zu können. Aktuell wird ausschließlich der Einfluss auf die Gesamtprojektdauer betrachtet. Hierzu werden Metriken entwickelt, um eine systematische Bewertung der simulationsbasierten Soll-Ist-Vergleiche vornehmen zu können (vgl. dritter Schritt in Abb. 1). Im vierten Schritt wird eine simulationsbasierte Anpassung des Bauablaufs vorgenommen, falls signifikante Abweichungen vom Soll-Ablaufplan festgestellt werden. Hierzu sind entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Modellierung und Integration der bauleistungsbasierenden Kenndaten (vgl. zweiter Schritt in Abb. 1).

4 Modellierung unscharfer baugestaltlicher Ist-Kenndaten

Es existieren verschiedene Ansätze, um mit Unsicherheiten behaftete Daten zu modellieren. Häufig werden Konzepte der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet, wenn sinnvolle Verteilungsfunktionen definiert werden können. Die Bestimmung geeigneter Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist nicht immer einfach, insbesondere wenn nicht auf umfangreiche statistische Daten zurückgegriffen werden kann. Die Integration von Verteilungen in Simulationsmodelle erfolgt hierbei im Wesentlichen unter Verwendung von Monte-Carlo-Methoden. Mit Hilfe von Zufallszahlen werden diskrete Eingangsparameter für die Simulationsexperimente bestimmt. Eine Vielzahl von Simulationsexperimenten wird durchgeführt und anschließend statistisch bewertet.

4.1 Fuzzy-Mengen und Alpha-Cuts

Liegen nur ungewisse sowie unpräzise Informationen vor, kann eine Fuzzy-Modellierung vorgenommen werden (vgl. Zadeh 1965). Gemäß der booleschen Mengentheorie, wird die Zugehörigkeit von Elementen zu einer Menge mit nur zwei Zuständen beschrieben. Ein Element ist Teil oder nicht Teil einer Menge. In der Fuzzy-Mengen Theorie wird die Logik der Zugehörigkeit erweitert, indem die Zuordnung von Elementen zu einer Menge auf Basis der sogenannten Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ mit $\mu(x) \in [0,1]$ erfolgt. Eine Fuzzy-Menge X wird dann als eine Menge von Paaren $(x, \mu(x))$ mit $x \in \mathbb{R}$ beschrieben. Zum Beispiel bedeutet dies für ein x mit $\mu(x) = 0$, dass dieser Wert nicht zur Menge X gehört. Mit Hilfe von Fuzzy-Mengen lassen sich unscharfe Aussagen durch die Zuordnung von linguistischen Werten definieren. Beispielsweise kann die Aussage „Lieferung des Betonfertigteils erfolgt in ungefähr fünf Tagen“ mit Hilfe der Fuzzy-Menge in Abbildung 2 definiert werden. Hierbei wird die Aussage „ungefähr fünf Tage“ über eine Dreiecksfunktion mit den Werten drei, fünf und sieben Tagen beschrieben, wobei fünf Tage vollständige Zugehörigkeit bedeutet.

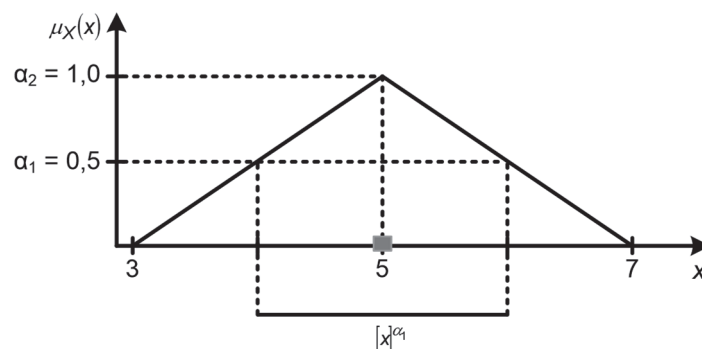


Abbildung 2: Fuzzy-Menge der Aussage „Lieferung des Betonfertigteils erfolgt in ungefähr fünf Tagen“

Zur Auswertung von Fuzzy-Mengen im Rahmen von ereignisdiskreten Simulationen müssen wiederum diskrete Werte erzeugt werden. In diesem Zusammenhang kann

die sogenannte Alpha-Cut-Methode verwendet werden. Ein Alpha-Cut kann als Grad der Sicherheit bzgl. der definierten Aussage interpretiert werden. Im Beispiel aus Abbildung 2 bedeutet ein Alpha-Cut bei 1,0, dass mit 100% Sicherheit die Lieferung in fünf Tagen erfolgt. Hingegen erfolgt die Lieferung zwischen vier und sechs Tagen bei einem Alpha-Cut von 0,5. Für eine vollständige Analyse der Fuzzy-Menge wird eine bestimmte Anzahl von Alpha-Cuts definiert. Je Alpha-Cut wird ein Intervall auf Basis des minimalen und maximalen x Wertes bestimmt. Anschließend erfolgt eine gleichverteilte Probennahme von Stützwerten aus diesem Intervall. Diese Stützwerte werden als diskrete Parameter im Rahmen der Simulation verwendet. Wie beim Monte-Carlo-Verfahren erfolgt im letzten Schritt eine statistische Auswertung der verschiedenen Simulationsexperimente. Abebe et al. (2000) und Hanss (2005) haben gezeigt, dass im Vergleich zur Monte-Carlo-Methode deutlich weniger Alpha-Cut-Methode Experimente durchgeführt werden müssen, um die gleiche Bewertungsqualität zu erreichen. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Alpha-Cuts ist, dass durch die Angabe eines Sicherheitsniveaus, subjektive Einschätzungen besser berücksichtigt werden können (vgl. Kulejewski 2011).

4.2 Fuzzy-basierte Lieferketten

Die Erfassung von Material und Ressourcen erfolgt im Bauwesen in der Regel recht unregelmäßig und nur zu bestimmten Zeitpunkten bzw. an bestimmten Erfassungsorten. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung, Lieferung und Montage von Betonfertigteilen. Hier können Informationen bei Produktionsbeginn, bei Fertigstellung, beim Verlassen des Fertigteilwerks, unter anderem bei Zwischenlagerungen bzw. Zwischentransporten und bei Ankunft auf der Baustelle automatisch erfasst und zur Verfügung gestellt werden (s. Abb. 3).

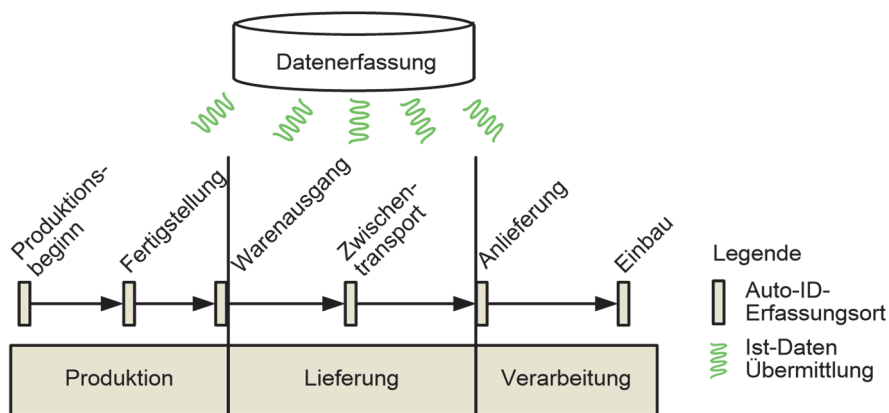


Abbildung 3: Exemplarische Lieferkette für Betonfertigteile

Die Zeitdauer zwischen den einzelnen Erfassungspunkten kann häufig nicht genau angegeben werden. Hier eignen sich insbesondere Fuzzy-basierte Angaben, die zusätzlich mit einem Sicherheitsniveau belegt werden können (vgl. Zhang et al. 2005). Zur Fuzzy-basierten Beschreibung von Zeitdauern zwischen zwei Erfassungszeitpunkten wurden linguistische Aussagen mit Fuzzy-Mengen definiert. Die unpräzisen Angaben umfassen die linguistischen Werte „ungefähr“ und „etwa“.

zwischen“. Es werden nur ganze bzw. halbe Tage angegeben, da eine detailliertere Planung im Bauwesen häufig nicht möglich ist. Für die Modellierung werden ausschließlich Dreiecks- oder Trapez-Fuzzy-Mengen verwendet. In Abbildung 4 sind zwei typische Fuzzy-Mengen dargestellt. Die Definition von geeigneten Fuzzy-Mengen ist äußerst wichtig. Hierbei sollte auf entsprechende Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Insbesondere bei großen Zeiträumen, wie beispielsweise „etwa zwischen 4 und 8 Wochen“, müssen die Extremwerte geeignet gewählt werden. Liegen aktuelle Erfassungsdaten am Anfang einer umfangreichen Lieferkette vor, müssen die Fuzzy-Mengen kombiniert werden.

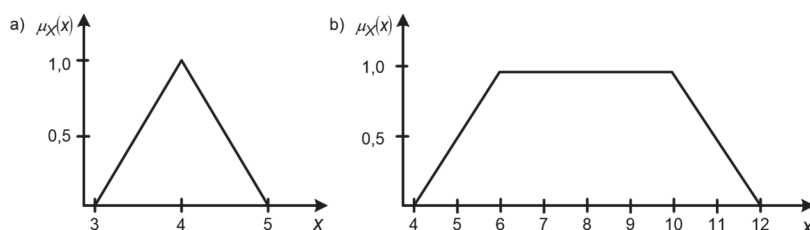


Abbildung 4: Typische Fuzzy-Mengen für Zeitdauern: a) ungefähr vier Tage b) etwas zwischen 6 und 10 Tagen

5 Simulationsbasierte Analyse bauleistungsbedingter Ist-Kenndaten

Im Rahmen der Analyse von aktuellen bauleistungsbedingten Ist-Kenndaten wird ein Constraint-basierter Simulationsansatz verwendet (vgl. König et al. 2007). Hierbei werden alle Randbedingungen bzw. Restriktionen der betrachteten Prozesse mit Hilfe von Hard und Soft Constraints modelliert. Als Hard Constraints können beispielsweise technologische Reihenfolgen, Sicherheitsbereiche, Liefertermine, notwendige Ressourcen und andere Restriktionen definiert werden, die zwingend erfüllt werden müssen. Im Gegensatz dazu können für bestimmte Prozesse auch sinnvolle bzw. zweckmäßige Randbedingungen, sogenannte Soft Constraints definiert werden. Soft Constraints müssen nicht vollständig erfüllt werden. Es handelt sich hierbei um ein allgemeines Constraint Satisfaction Problem (vgl. Rossi et al. 2006). Zur Generierung eines unter den Hard und Soft Constraints gültigen Bauablaufs wird die ereignisdiskrete Simulation verwendet. Bei jedem Ereignis werden alle noch nicht ausgeführten Prozesse in Hinblick auf ihre Hard und Soft Constraints geprüft und gegebenenfalls gestartet. Ein wesentlicher Vorteil dieses Konzepts ist, dass sehr einfach zusätzliche Bedingungen integriert werden können. Die Constraint-basierte Simulation wurde bereits erfolgreich in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt und ist im Rahmen des Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) auf Basis des Simulationsframeworks Plant Simulation der Firma Siemens implementiert (vgl. Steinhauer und König 2010).

Für die Simulation der Auswirkungen von unscharfen bauleistungsbedingten Ist-Kenndaten werden unter Verwendung der Alpha-Cut-Methode diskrete Eingangswerte, wie beispielsweise konkrete Liefertermine, erzeugt (vgl. zweiter Schritt in Abb. 1). Diese zusätzlichen Randbedingungen werden als zusätzliche Hard Constraints für

die entsprechenden Produktionsprozesse abgelegt und somit in die Simulation integriert. Durch die Angabe eines Sicherheitsniveaus kann die Anzahl der notwendigen Simulationsexperimente sehr gut gesteuert werden, um statistisch signifikante Aussagen über die Auswirkungen der unscharfen bauleistungsbezogenen Ist-Kennwerten zu erhalten. Zur Generierung und Kettung von Fuzzy-basierten bauleistungsbezogenen Ist-Kennwerten und deren Analyse mit Hilfe von Alpha-Cuts wird ein entsprechender Datenbaustein implementiert. Des Weiteren wurden Softwarebausteine zur Auswertung der einzelnen Simulationsexperimente bzgl. der möglichen Auswirkungen einzelner Ist-Kennwerten auf die Produktionsprozesse umgesetzt.

6 Fallbeispiel

Zur Verifikation der Funktionsweise und Anwendbarkeit des Ansatzes zur Modellierung und Simulation unscharfer bauleistungsbezogener Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie, wurden synthetische Bauprozesse für den Rohbau eines Bürogebäudes aufgestellt. Die Bauprozesse umfassen die Fertigung der Deckenplatten in Ortbeton sowie die Errichtung von Wänden und Stützen mittels Betonfertigteilen. Mit Hilfe eines Simulationsmodells wurde ein Soll-Baulaufplan erzeugt, welcher als Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich im Rahmen der reaktiven Planung verwendet wird.

Zur Analyse von unscharfen bauleistungsbezogenen Informationen wurden exemplarische Erfassungszeitpunkte definiert und deren Einflüsse auf die Bauprozesse mit Hilfe von Fuzzy-Mengen bewertet. Dabei wurden zwei verschiedene Arten von bauleistungsbezogenen Informationen berücksichtigt. Zum einen wurde eine verspätete Fertigteillieferung von Stützelementen (Variante 1) und zum anderen der Ausfall des Krans zum Transport der Fertigteile untersucht (Variante 2). Die dritte Variante umfasst die Kombination der beiden ersten Varianten. Zum Erfassungszeitpunkt t_0 liegen bauleistungsbezogene Informationen vor. Die Lieferung, die in zwei Tagen erwarteten Betonfertigteile, verzögert sich um „etwa drei bis sechs Tage“ (Variante 1). Zum gleichen Erfassungszeitpunkt wird festgestellt, dass der für den Transport der Fertigteile benötigte Kran für „etwa drei Tage“ ausfällt. Die Modellierung dieser unscharfen Aussagen erfolgt durch Dreieck- bzw. Trapez-Fuzzy-Mengen. Für die Bewertung der Auswirkungen wurden für die zwei Fuzzy-Mengen je zwei Alpha-Cut-Analysen mit den Werten $\alpha_1 = 0,3$ (30%) und $\alpha_2 = 0,8$ (80%) mit jeweils 100 Simulationsexperimenten durchgeführt. Die Anzahl der Experimente wurde durch empirische Stichproben ermittelt und gibt einen gerundeten Schwellwert an, ab welchem sich die Ergebnisse nur noch minimal ändern.

Die statistische Auswertung umfasst die resultierende Projektverzögerung infolge der verspäteten Lieferung sowie den Ausfall des Krans (s. Tab. 1). Für beide Alpha-Cuts fällt die durchschnittliche Projektverzögerung geringer aus, als die mittels Fuzzy-Mengen modellierte Annahme über die verspätete Lieferung bzw. den Kranausfall. Das liegt daran, dass vorhandene Zeitpuffer genutzt sowie andere Bauprozesse vorgezogen werden. Projektverzögerung der dritten Variante ist jeweils etwas größer. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass sowohl der Kran ausfällt, der von anderen Prozessen hätte genutzt werden können, als auch die Fertigteile nicht eingebaut werden können. Auf Basis dieser Analysen können nun geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden, falls die Auswirkungen als relevant eingestuft werden. Gegenmaßnahmen sind nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Tabelle 1: Ergebnisse der untersuchten Varianten

| Variante | durchschnittliche Verzögerung (in Tagen) | Standardabweichung (in Tagen) |
|---------------------------------|---|----------------------------------|
| Variante 1 mit $\alpha_1 = 0,3$ | 1,60 | 0,48 |
| Variante 2 mit $\alpha_1 = 0,3$ | 1,48 | 0,50 |
| Variante 3 mit $\alpha_1 = 0,3$ | 1,89 | 0,31 |
| Variante 1 mit $\alpha_2 = 0,8$ | 1,39 | 0,49 |
| Variante 2 mit $\alpha_2 = 0,8$ | 1,29 | 0,45 |
| Variante 3 mit $\alpha_2 = 0,8$ | 1,97 | 0,17 |

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die Modellierung und Simulation unscharfer bauleistungsbezogener Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie vorgestellt. Insbesondere im Bauwesen können sehr häufig keine diskreten Angaben bzgl. der Auswirkungen von aktuellen bauleistungsbearbeitenden Informationen auf den Bauablauf spezifiziert werden. Dies ist zum einen den sehr langen Lieferketten und zum anderen den sehr sporadischen Erfassungen geschuldet. Daher ist die Analyse und Bewertung von aktuellen bauleistungsbearbeitenden Informationen für die effiziente Ausführung der Bauprozesse essentiell. Mit Hilfe der Fuzzy-Theorie und dem Konzept der Alpha-Cut-Analyse können Auswirkungen auf einzelne Bauprozesse auf Grundlage von unpräzisen Informationen modelliert und untersucht werden. In diesem Beitrag wurden dazu ereignisdiskrete Simulationen auf Basis eines Constraint-basierten Ansatzes verwendet. Mit Hilfe der Alpha-Cut-Analyse werden diskrete Eingangswerte für die Simulation erzeugt. Anschließend können die Simulationsexperimente statistisch ausgewertet werden, um die Auswirkungen der aktuellen bauleistungsbearbeitenden Informationen bewerten zu können.

Die zukünftigen Forschungsarbeiten werden sich zum einen mit der systematischen Aufbereitung von Lieferketten und möglichen Erfassungsstrategien im Bauwesen beschäftigen. Es sollen Strategien entwickelt werden, um mit möglichst wenigen Erfassungspunkten möglichst sichere Aussagen treffen zu können. Zum anderen werden unter Verwendung von simulationsgestützter Optimierung bauleistungsspezifische Verfahren zur Anpassung des Bauablaufs entwickelt, falls signifikante Abweichungen erkannt wurden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojektes „Reaktive Bauablaufplanung auf Basis bauleistungsbearbeitender Ist-Kenndaten“.

Literatur

AbouRizk, S; 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, Austin (USA), 13.-16. Dezember 2009, S. 2624-2634
- Abebe, A.J.; Guinot, V.; Solomatine, D.P.: Fuzzy alpha-cut vs. Monte Carlo techniques in assessing uncertainty in model parameters. In: Proc. 4th International Conference on Hydroinformatics, Iowa City (USA), 23.-27. July 2000, ohne Seitenzahlen
- Engelhardt-Nowitzki, C.; Nowitzki, O.; Krenn, B.: Management komplexer Materialflüsse mittels Simulationen. State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2008
- Hanss, M.: Applied Fuzzy Arithmetic - An Introduction with Engineering Applications. Berlin: Springer 2005
- Helmus, M.; Kelm, A.; Laußat, L.; Meins-Becker, A.: RFID-Baulogistikleitstand. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011
- Hotz, I.; Hanisch, A.; Schulze, T.: Simulations-based early warning systems as a practical approach for the automotive industry. In: Perrone, L. L.; Wieland, F. P.; Liu, J.; Nicol, D. M.; Fujimoto R. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey (USA), 3.-6. Dezember 2006, S. 1962-1970
- Kim, C.; Ju, Y.; Kim, H.; Kim J.: Resource Management in Civil Construction Using RFID Technologies. In: 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Austin (USA), 24.-27. Juni 2009, S. 105-108
- König, M.; Beißert, U.; Steinhauer, D.; Bargstädt, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. In: Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation, Ljubljana (Slovenia), 9.-13. September 2007, ohne Seitenzahlen
- Kulejewski, J.: Construction project scheduling with imprecisely defined Constraints. In: Wamelink, H.; Geraedts, R.; Volker, L. (Hrsg.): Proceedings of the CIB International Conference Management and Innovation for a Sustainable Built Environment, Delft (Niederlande), 20.-23. Juni 2011, keine Seitenzahlen
- Ren, Z.; Anumba, C.; Tah, J.: RFID-facilitated construction materials management (RFID-CMM) - A case study of water-supply project. *Advanced Engineering Informatics* 25 (2011) 2, S. 198-207.
- Rossi, F.; van Beek, P.; Walsh T.: *Handbook of Constraint Programming*. Amsterdam: Elsevier 2006
- Shaheen, A. A.; Fayek, A. R.; AbouRizk, S. M.: Methodology for integrating fuzzy expert systems and discrete event simulation in construction engineering. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36 (2009) 9, S. 1478-1490.
- Steinhauer, D.; König, M.: Konzepte zum effektiven Aufbau von Simulationsmodellen für die Unikatproduktion. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 157-164
- Vojdani, N.; Rösner, R.: Systematisierung, Bewertung und Modellierung der Unsicherheiten in der Leerconstainerlogistik. *Logistics Journal* (2012), keine Seitenzahlen
- van de Vonder, S.; Ballestín, F.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W.: Heuristic procedures for reactive project scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 52 (2007) 1, S. 11-28.
- Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (1965) 3, S. 338-353.