

# Von der Netzplantechnik zur Simulation - Analyse von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Hohmann  
Professur Computergestützte Techniken  
Bauhaus-Universität Weimar  
D-99421 Weimar

## 1. Einleitung

Bauwerke besitzen eine lange Lebensdauer und erfordern bei ihrer Errichtung und Nutzung große materielle und finanzielle Aufwendungen. Sie sollen sich gut in ihre Umgebung (Natur, vorhandene Bebauung) einordnen. Es werden demzufolge hohe gestalterische, funktionale, technische und ökonomische Anforderungen an ein Bauwerk gestellt.

Im Rahmen der Bauplanung und -ausführung verwendet der Architekt bzw. der Bauingenieur die unterschiedlichsten Modelle (u. a. graphisches, gegenständliches, numerisches Modell). Hierbei handelt es sich in der Regel um statische Modelle mit deterministischen Parametern.

Mit wachsender Leistungsfähigkeit der Computer kommen dynamische Modelle mit stochastischen bzw. unscharfen Parametern zum Einsatz. Sie ermöglichen mittels Simulation bzw. Animation eine gute Abschätzung der gestalterischen, funktionalen, technischen und ökonomischen Zusammenhänge eines Bauwerkes.

So gilt beim Entwurf zunehmend das Interesse dem Erlebarmachen von gedachter Architektur im „bildlichen Durchschreiten“ des Geplanten mittels Computeranimation.

Im konstruktiven Bereich sind solche Tragstrukturen zu entwickeln, welche einerseits in der Lage sind, auftretende Lasten aufzunehmen und andererseits möglichst wirtschaftlich gefertigt werden können. Da weder für die Lasten, die geometrischen Abmessungen noch die Materialeigenschaften exakte Werte vorliegen, wird in jüngster Zeit verstärkt die Zuverlässigkeitsanalyse von Tragwerken mittels Simulation durchgeführt.

Bei der Bauausführung ist eine gründliche und umfassende Planung sowie wirksame Kontrolle und Steuerung erforderlich. Realitätsnahe Lösungen hierfür sind durch die computergestützte Simulation der Prozeßabläufe sowie die Parameterschätzung mittels Fuzzy-Verfahren erreichbar. Dabei stellen Petri-Netze und deren Erweiterungen ein zweckmäßiges Hilfsmittel zur System- und Prozeßmodellierung dar.

Dieser Beitrag befaßt sich schwerpunktmäßig mit Fragen der Modellbildung und Simulation sowie der Datenbereitstellung in der Phase der Bauausführung.

## 2. Analyse der Planungsmethoden für Baustellenprozesse

Nichtstationäre Baustellenprozesse sind dadurch gekennzeichnet, daß ihr Ablauf nicht vollständig vorhersehbar ist, sondern einer Vielzahl von Einflüssen und Störungen unterworfen sein kann. Um die vorhandenen, kostenintensiven Ressourcen eines Bauunternehmens trotzdem möglichst wirtschaftlich einsetzen zu können, ist eine gründliche Planung sowie wirksame Kontrolle und Steuerung unumgänglich. Darüber hinaus ergibt sich oft die Notwendigkeit, nachträglich einen bereits abgeschlossenen Bauablauf zu beurteilen, um Forderungen, welche z.B. durch Störungen des Bauablaufes hervorgerufen wurden, zu begründen oder abzuweisen.

Zur Planung und Steuerung der Baustellenprozesse sind daher Methoden erforderlich, welche u.a. eine große Anpassungsfähigkeit, die Darstellung paralleler Vorgänge, die Erfassung plötzlicher Störungen sowie stochastische bzw. unscharfe Parameter zulassen.

Zwei Problemkreise stehen bei der Planung der Baustellenprozesse im Vordergrund:

- die Terminanalyse  
die Produktionsanalyse.

In der Praxis dient in den meisten Fällen das Balkendiagramm bzw. die Netzplantechnik als Planungshilfsmittel. Die Anwendung von Simulationsmethoden stellt bisher noch die Ausnahme dar. Dabei ist der Informationsgehalt

der Netzplantechnik eindeutig geringer gegenüber der Simulation. So lassen sich Fragen nach der Produktivität von Einsatzmitteln, Leistungsreserven bzw. Ursachen von Leistungsminderungen mit der Netzplantechnik kaum beantworten.

Deterministische Berechnungen ergeben in der Regel kürzere Gesamtdauern gegenüber stochastischen, d.h., sie fallen zu optimistisch aus. Zwar läßt innerhalb der Netzplantechnik die Methode PERT Ansätze mit stochastischen Dauern zu, es wurde jedoch mehrfach nachgewiesen, daß die Ergebnisse (Erwartungswert, Streuung) erhebliche Fehler aufweisen.

### **3. Darstellung von Prozessen und Systemen der Bauproduktion mit Petri-Netzen**

Ein Wechsel von der Netzplantechnik zur Simulation ist möglich, indem Netzpläne auf der Grundlage von Petri-Netzen dargestellt werden und somit schrittweise ein Übergang zur computergestützten Simulation erfolgt[4].

Jeder Netzplan ist als Petri-Netz darstellbar. Die Umkehrung gilt nicht, da das Petri-Netz zyklische Strukturen zuläßt. Bei der Darstellung eines CPM-Netzplanes als Petri-Netz entsteht ein Synchronisationsnetz, d.h., jede Stelle (passiver Knoten) des Netzes besitzt maximal eine Ein- bzw. Ausgangskante.

Wie bekannt, läuft jeder Prozeß (bestehend aus einzelnen Operationen) innerhalb eines Systems (bestehend aus einzelnen Operatoren) ab, d.h., das System ist Träger des Prozesses. Mit Hilfe von Netzplänen können nur Prozesse dargestellt werden. Petri-Netze gestatten dagegen sowohl die Modellierung von Prozessen als auch von Systemen.

Wird das System mittels Petri-Netz dargestellt, so kann auf Grundlage dieses Modells der zugehörige Prozeß mittels Simulation untersucht werden.

Seit Mitte der 80er Jahre liegen unseren Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig die Evaluationsnetze (E-Netze) zugrunde [1], [2], [3].

Sie stellen eine spezielle Klasse der Petri-Netze dar. Da bei diesen Netzen Entscheidungstransitionen definiert sind, lassen sich, neben der Einbeziehung stochastischer Dauern, auch Netze mit stochastischen Strukturen darstellen und simulieren. Ferner können den Marken des Netzes Attribute zugeordnet werden, deren Werte beim Schalten der Transitionen, durch entsprechende Algorithmen, veränderbar sind.

Dieser von uns eingeschlagene Weg, der Simulation von Bauprozessen auf der Grundlage bestimmter Klassen von Petri-Netzen wurde, durch entsprechende Arbeiten an anderen Universitäten, bestätigt[5], [6].

### **4. Einbeziehung von Fuzzy-Verfahren in die Zeitrechnung**

Neben der Modellbildung kommt der Bereitstellung realitätsnaher Parameter, die den Berechnungen zugrunde gelegt werden, eine große Bedeutung zu. Darauf, daß deterministische Größen für die Bauablaufplanung nur bedingt geeignet sind, wurde bereits hingewiesen. Bei der Simulation wird daher mit stochastischen Größen, die sich aus entsprechenden Verteilungen ergeben, gerechnet.

Bei der Terminplanung liegen oft bestimmte äußere Einflüsse sowie das entsprechende Expertenwissen in unscharfer Weise vor. Hier bietet sich der Einsatz von Fuzzy-Verfahren an. Mit ihrer Hilfe lassen sich unscharfe Faktoren erfassen und in die Planung einbeziehen [7].

Analog zur Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik bilden die folgenden Schritte des unscharfen Schließens die Grundlage:

- Definition der Ein- und Ausgangsvariablen
- Fuzzifizieren der Ein- und Ausgangsvariablen
- Schlußfolgerungen mit Fuzzy-Regelmenge
- Defuzzifizieren der Ausgangsvariablen.

Werden unscharfe Größen der Zeitrechnung zugrunde gelegt, so ergeben sich im Ergebnis auch keine scharfen Terminaussagen. Somit gibt es z.B. bei der Netzplanberechnung auch keinen eindeutigen kritischen Weg, sondern auf verschiedenen Wegen des Netzes kritische Potentiale infolge unscharfer Terminaussagen. Die kritische Stufe

(kritisches Potential) eines Vorganges ermittelt sich aus der Höhe des negativen Bereiches auf der Zugehörigkeitsfunktion des Gesamtpuffers [7].

Analog können unscharfe Größen in die Simulationsrechnungen auf der Grundlage von Petri-Netzen einbezogen werden.

## 5. Beispiel zur Modellbildung und Datenbereitstellung

Als Beispiel wird die Planung von Erdbauarbeiten im Zusammenhang mit dem Bau einer Talbrücke gewählt [6]. Es sei die Aufschüttung eines Erddammes auf der einen und ein Bergeinschnitt auf der anderen Talseite auszuführen. Das Erdreich aus dem Einschnitt soll für den Dammbau verwendet werden. Für den Erdtransport ist eine Baustraße vorgesehen, die im Talbereich zweispurig ausgebaut ist, im Hangbereich der Bodenentnahme und der Dammaufschüttung jedoch nur ein spurig.

Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Ladegeräten und Transportfahrzeugen soll erreicht werden.

Bedingt durch die teilweise einspurigen Wegstrecken, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Fahrzeugzahl und Transportleistung. Exakte mathematische Verfahren zur Leistungsermittlung sind für dieses relativ einfache Beispiel nicht vorhanden.

Infolge der zyklischen Wiederholung der einzelnen Arbeitsvorgänge scheidet die Prozeßdarstellung und Berechnung mittels eines Netzplanes aus. Das System läßt sich jedoch sehr einfach als Petri- bzw. E-Netz darstellen. Auf dieser Grundlage ist es möglich, die Anzahl der Transportfahrzeuge in verschiedenen Simulationsläufen zu variieren, um somit ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den einzelnen Arbeitsmitteln (Lade- und Transporteinheiten) zu erreichen. Bild 1 zeigt das zugehörige Peti-Netz.

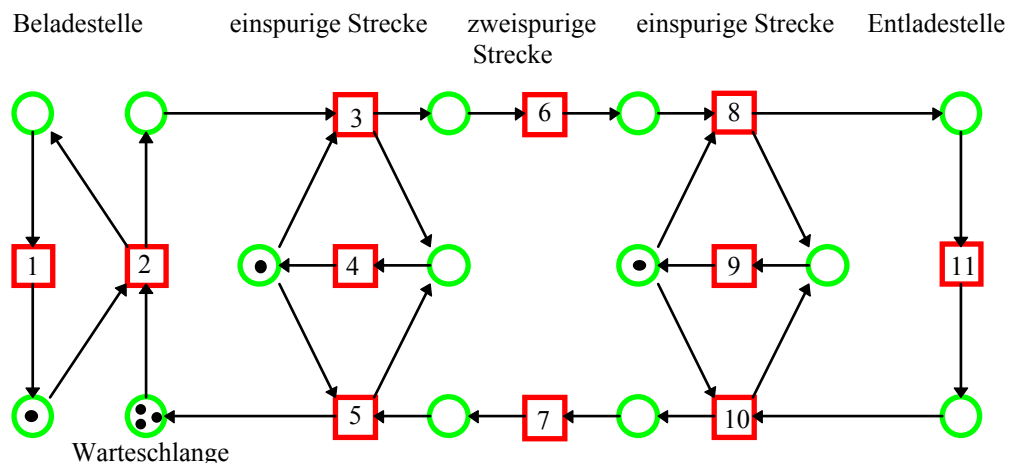


Bild 1: System Erdtransport als Petri-Netz

Die einzelnen Transitionen im Bild 1 realisieren folgende Aufgaben:

- Transition 1: Bereitstellung Ladegerät
- Transition 2: Beladen der Fahrzeuge
- Transition 3: Lastfahrt auf einspuriger Strecke
- Transition 4: Vorfahrtregelung für Lastfahrt
- Transition 5: Leerfahrt auf einspuriger Strecke
- Transition 6: Lastfahrt auf zweispuriger Strecke
- Transition 7: Leerfahrt auf zweispuriger Strecke
- Transition 8: Lastfahrt auf einspuriger Strecke
- Transition 9: Vorfahrtregelung für Lastfahrt
- Transition 10: Leerfahrt auf einspuriger Strecke
- Transition 11: Entladen

Zwischen den Transitionen 3 und 5 bzw. 8 und 10 kann ein Konflikt entstehen. Eine mögliche Lösung besteht darin, daß den Transitionen mit niedrigerer Nummer beim Schalten der Vorrang eingeräumt wird. Bei Verwendung der E-Netze erfolgt die Vorrangregelung über spezielle Entscheidungstransitionen.

Die Dauern für das Laden und Transportieren werden durch äußere Störungen beeinflusst. Es ist daher sinnvoll, die Dauern der einzelnen Teilleistungen mittels Fuzzy-Verfahren, z.B. infolge der Variablen Niederschlagsmenge, Tagestemperatur sowie Bodenlösbarkeit zu ermitteln.

Aus Erfahrungen bzw. Statistiken erfolgt zunächst die Fuzzifizierung der Ein- und Ausgangsvariablen, indem die Attribute und Zugehörigkeitsfunktionen für jede Variable definiert werden. Bild 2 zeigt dieses am Beispiel des Niederschlages.

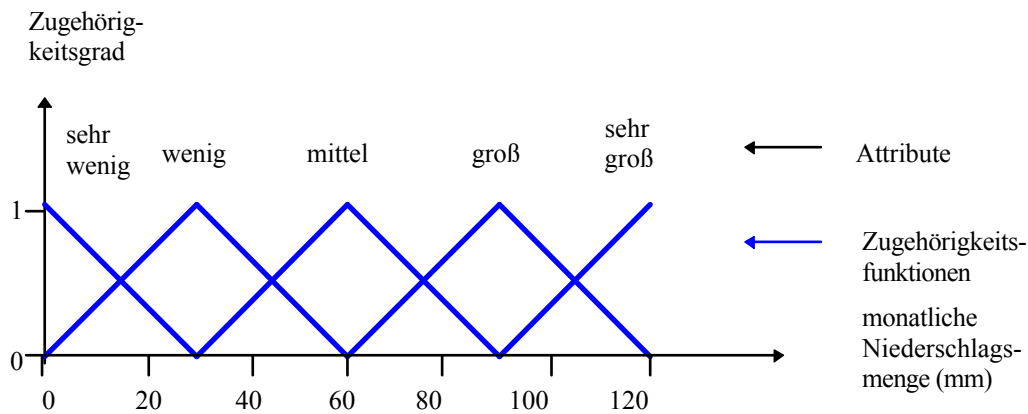


Bild 2: Attribute und Zugehörigkeitsfunktionen für den Niederschlag

Analog können die Zugehörigkeitsfunktionen für:

- die Tagestemperatur mit den Attributen  
sehr tief / tief / angenehm / hoch / sehr hoch
- die Bodenlösbarkeit mit den Attribute  
leicht lösbar / mittelschwer lösbar / schwer lösbar / gesprengter oder gerissener Fels

angegeben werden.

Es schließt sich der Aufbau der Regelbasis (WENN ... DANN-Regeln) mit Schlußfolgerungen an, z. B.:

Rege 1: WENN Bodenlösbarkeit = schwer lösbar UND Niederschlagsmenge = mittel  
DANN Beladedauer = Verzögerung.

Durch Defuzzifizierung wird schließlich die Ausgangsvariable (Beladedauer bzw. Transportdauer) ermittelt. Für die Dauern können folgende Attribute angegeben werden:

große Verkürzung / Verkürzung / normaler Dauer / Verzögerung / große Verzögerung.

Mittels Simulation auf der Grundlage von Netzstrukturen unter Einbeziehung der Fuzzy-Technologie läßt sich somit rechnergestützt eine realitätsnahe Abschätzung entsprechender Baustellenprozesse erreichen.

## 6. Abschließende Bemerkungen

Mit Hilfe von Petri-Netzen bzw. deren Erweiterungen lassen sich vielfältige graphentheoretische Problemstellungen anschaulich darstellen und berechnen. Dazu gehören Netzpläne mit deterministischen bzw.

stochastischen Dauern sowie mit deterministischen bzw. stochastischen Strukturen. Darüber hinaus sind Systemstrukturen (mit Zyklen) darstellbar, auf deren Grundlage eine Prozeßsimulation erfolgen kann. Auch läßt sich die Suche optimaler Wege in Netzen (Dynamische Optimierung) in anschaulicher Weise, infolge entsprechender Markenauswahl, demonstrieren.

Um eine realitätsnahe Berechnung von Bauprozessen zu erreichen, sind bei der Datenbereitstellung verstärkt Fuzzy-Verfahren zu nutzen. Dieses Gebiet erfordert jedoch noch weitere Untersuchungen im Rahmen von Forschungsarbeiten.

Sowohl zur Darstellung von Petri-Netzen als zur Berechnung (Simulation) auf deren Grundlage sowie zur Aufbereitung der Daten mittels Fuzzy-Verfahren liegen entsprechende Rechenprogramme vor. Ihr Einsatz scheitert jedoch noch oft daran, daß die Handhabung relativ aufwendig, der Lernaufwand zu groß sowie die Anwenderfreundlichkeit zu gering ist.

## Literatur

- [1] *Hohmann, G.*: ein Beitrag zur Modellierung, Simulation und Steuerung in CAD/CAM Systemen des Bauwesens; Dissertation B  
Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen 1984
- [2] *Alkadi, G.*: Ein Beitrag zur Projektierung von flexiblen Fertigungssystemen im Bauwesen mittels Prozeßsimulation; Dissertation  
Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen 1989
- [3] *Schmidt, R.*: Beitrag zur Modellierung und rechnergestützten Simulation technologischer Prozesse mit Hilfe variiertes Evaluationsnetze; Dissertation  
Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen 1990
- [4] *Hain, J.*: Suche optimaler Wege in erweiterten Petri-Netzen: Diplomarbeit  
Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen 1991
- [5] *Franz, V.*: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen; Dissertation  
Kassel: Gesamthochschule-Universität 1989
- [6] *Iwan, G.*: Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgenoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1992
- [7] *Xiong, G.*: Computergestützte Planung der Baustellen-Abläufe  
Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 1995