

Simulationsbasierter Ansatz zur Unterstützung der Bauproduktionsplanung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

an der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Mikko Börkircher

aus Mühlacker

| | |
|-----------------------------|--|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 13.05.2011 |
| Hauptreferent: | Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gert Zülch |
| Korreferent: | Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz |

ifab

Forschungsberichte
aus dem Institut für
Arbeitswissenschaft und
Betriebsorganisation der
Universität Karlsruhe

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Gert Zülch

Band 40 - 2011

Mikko Börkircher

**Simulationsbasierter Ansatz zur
Unterstützung der Bauproduktionsplanung**

Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0168-6

ISSN 0940-0559

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Im Bereich des Maschinenbaus werden bereits seit vielen Jahren rechnerunterstützte Verfahren zur Planung von Produktionssystemen eingesetzt. Die Bandbreite reicht dabei von einfachen Verfahren auf der Basis der Tabellenkalkulation über Warteschlangenmodelle bis hin zu Simulationsverfahren und Werkzeugen der so genannten Digitalen Fabrik. Wurden derartige Verfahren zunächst vorrangig im Bereich der Großserienfertigung genutzt, so lassen sich zumindest einige von ihnen, insbesondere die Simulation, auch für die Planung von Produktionssystemen zur Einzel- und Kleinserienfertigungen anwenden. Die Aufgaben von Simulationsstudien ist es vor allem, Engpässe oder auch Überkapazitäten bereits in der Planungsphase zu erkennen und die Produktionsressourcen entsprechend anzupassen. Darüber hinaus können die Effektivität eines Produktionssystems in Folge schwankender Auslastungssituationen sowie Störungen im Produktionsablauf analysiert und die Auswirkungen anhand geeigneter Kennzahlen monetär und produktionslogistisch bewertet werden.

Da Simulationsverfahren die Produktionsprozesse im dynamischen Zusammenwirken der beteiligten Produktionsressourcen abbilden können, kommt ihnen eine besondere Bedeutung zu. Gegenüber statischen Verfahren wie der Tabellenkalkulation werden realistischere Aussagen möglich, weil die Konkurrenz der Vorgänge um begrenzte Ressourcen mit den daraus folgenden Behinderungen im Produktionsablauf implizit im Simulationsmodell enthalten ist und die Belastungen der Ressourcen durch Vorgänge nicht bloß numerisch aggregiert werden.

In der Praxis der Bauproduktion herrschen jedoch statische Planungsverfahren vor, beispielsweise auf der Basis der Tabellenkalkulation und der Netzplantechnik. Störungen im Bauablauf werden bei der Planung allenfalls in Form von Szenarien abgebildet. Simulationsverfahren und Werkzeuge der virtuellen Bauablaufplanung sind

zwar in einigen Ausprägungen vorhanden, haben aber den Wissenschaftsbereich erst kaum verlassen.

Diese Ausgangssituation wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und dabei das Ziel verfolgt, ein bestehendes Simulationsverfahren aus dem Wissenschaftsbereich, das bisher für die Untersuchung von Produktions- und Dienstleistungssystemen genutzt wird, für die Simulation von Bauabläufen zu erweitern. Für diesen Anwendungsbereich der Simulation ist dabei von Bedeutung, dass die Bauproduktion im Grundsatz eine Einzelproduktion darstellt, gleichartige Bauwerke aber dennoch durch unterschiedliche Abläufe realisiert werden können. Ein weiterer spezifischer Aspekt besteht darin, dass an der Erstellung eines Bauwerkes eine Vielzahl einzelner Gewerke beteiligt ist, die von selbstständigen Unternehmen durchgeführt und durch ein Generalunternehmen koordiniert werden. Typisch sind weiterhin die vielfältigen Störungsmöglichkeiten im Bauablauf, die zu einem gehörigen Teil nicht beeinflusst werden können, wie vor allem ungünstige klimatische Bedingungen. Weiterhin kommen Störungen durch unzulängliche Materiallieferungen, Ausführungsfehler und zeitliche Verzögerungen unterschiedlichster Herkunft in Betracht. Zusätzlich können die räumlichen Bedingungen verhindern, dass eigentlich gleichzeitig durchführbare Arbeitsvorgänge sequenziell durchgeführt werden müssen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich gerade dem Aspekt der Störungen und ihres Einflusses auf den Bauablauf. Zu diesem Zweck wird ein Katalog von Ablaufstörungen entwickelt und der darin enthaltene Datenbestand dazu benutzt, Störungsszenarien zu generieren. Zielrichtung dieser Szenarien ist es, alternative Bauabläufe zu modellieren und diese hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Störungen zu analysieren. Die Vorteilhaftigkeit dieses simulationsbasierten Ansatzes wird abschließend anhand von Ausbaurbeiten bei einem Reihenhausbau aufgezeigt. Ein weiteres Beispiel behandelt Instandhaltungsarbeiten in der Baustoffindustrie, womit dann die Anwendung auf den Bereich des Anlagenbaus ausgeweitet wird.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
G. Zülch

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| 1. Handlungsbedarf bei der Unterstützung der Bauproduktionsplanung | 8 |
| 1.1 Besonderheiten der Bauproduktion | 8 |
| 1.2 Defizite derzeitiger Planungsmethoden | 13 |
| 1.2.1 Deterministische Planung von Bauproduktionen | 13 |
| 1.2.2 Derzeitige Behandlung von Bauablaufstörungen | 14 |
| 1.3 Problembeschreibung und Zielsetzung der Arbeit | 15 |
| 1.4 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise | 17 |
| 2. Stand der Technik | 21 |
| 2.1 Charakterisierung baubetrieblicher Prozesse und Ablaufstrukturen | 21 |
| 2.1.1 Die Begriffe "Bauablauf" und "Bauprozess" | 22 |
| 2.1.2 Strukturierung einer Baustelle in Ablaufabschnitte | 25 |
| 2.1.2.1 Elementarer Ablaufabschnitt "Vorgang" | 25 |
| 2.1.2.2 Systematik der Ablaufstrukturplanung einer Baustelle | 26 |
| 2.2 Begriffsbestimmungen und Problemabgrenzung | 28 |
| 2.2.1 Arbeitsvorbereitung im Bauwesen | 29 |
| 2.2.2 Ablaufplanung von Bauprojekten | 32 |
| 2.2.3 Abgrenzung der Begriffe "Unsicherheit", "Unschärfe" und "Ungewissheit" | 33 |
| 2.3 Verfahren zur Bauablaufplanung | 37 |
| 2.3.1 Herkömmliche Vorgehensweise bei der Bauablaufplanung | 37 |
| 2.3.2 Spezielle Forschungsansätze für die Bauablaufplanung | 39 |
| 2.3.2.1 PERT-Netzplantechnik | 41 |
| 2.3.2.2 Fuzzy-Methoden | 41 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.3.2.3 | Petri-Netze | 43 |
| 2.3.2.4 | Sonstige Ansätze | 44 |
| 2.3.3 | Simulationsunterstützte Methoden zur Bauablaufplanung | 45 |
| 2.3.3.1 | Angloamerikanische Forschungsansätze | 46 |
| 2.3.3.2 | Deutsche Forschungsansätze | 51 |
| 2.4 | Verfahren zur Bewertung einer Bauproduktion | 59 |
| 2.4.1 | Vergangenheitsorientierte Bewertung der Bauproduktion | 60 |
| 2.4.2 | Ansätze für eine aggregierende Bewertung der Bauproduktion | 60 |
| 2.5 | Organisatorische Verbesserungspotenziale in der Bauproduktion | 63 |
| 2.5.1 | Verbesserung der Terminplanung bei beschränkten Ressourcen | 63 |
| 2.5.2 | Verbesserung des Informationsflusses und der Kooperation zwischen Baubeteiligten | 64 |
| 2.5.3 | Verbesserung der Arbeitsvorbereitung | 65 |
| 2.6 | Berücksichtigung von Bauablaufstörungen | 66 |
| 2.7 | Diskussion und Anforderungen an ein neues Verfahren zur Bauproduktionsplanung | 68 |
| 2.7.1 | Anforderungen an ein neues Planungsverfahren | 69 |
| 2.7.2 | Anforderungen an ein Bewertungsverfahren | 71 |
| 2.7.3 | Anforderungen an störungsrobuste Bauproduktionen | 73 |
| 2.8 | Simulation als Werkzeug zur Erkenntnisgewinnung | 75 |
| 3. | Konzept für die Modellierung einer Bauproduktion | 77 |
| 3.1 | Bausteine einer simulationsbasierten Planungsunterstützung im Baubetrieb | 77 |
| 3.2 | Das Produktionssystem "Baustelle" | 79 |
| 3.3 | Modellierung einer Bauproduktion | 80 |
| 3.3.1 | Zusammenhang zwischen Bauauftrag und Bauproduktion | 81 |
| 3.3.2 | Gewerke und übergeordnete Sparten | 82 |
| 3.3.3 | Bauprozesse und zugeordnete Vorgänge | 84 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.3.4 | Berücksichtigte Zeitarten im Baubetrieb | 86 |
| 3.3.4.1 | Auftragszeit eines Vorgangs | 86 |
| 3.3.4.2 | Durchführungszeit eines Vorgangs | 90 |
| 3.3.4.3 | Durchlaufzeit einer Bauproduktion | 91 |
| 3.3.5 | Personal und Qualifikation | 95 |
| 3.3.6 | Kapazitätsplanung im Baubetrieb | 98 |
| 3.3.6.1 | Bestimmung des Kapazitätsbedarfs und –bestands | 99 |
| 3.3.6.2 | Kapazitätsabstimmung zur Deckung von Kapazitätsbedarf und –bestand | 102 |
| 3.4 | Modellierung von Bauablaufstörungen | 103 |
| 3.4.1 | Definition von Bauablaufstörungen | 104 |
| 3.4.1.1 | Der Begriff "Störung" | 104 |
| 3.4.1.2 | Ursachen- und wirkungsorientierte Definitionen | 104 |
| 3.4.2 | Kategorisierung von Bauablaufstörungen | 105 |
| 3.4.2.1 | Ursachen für Bauablaufstörungen | 105 |
| 3.4.2.2 | Auswirkungen von Bauablaufstörungen | 107 |
| 3.4.3 | Ansatz zur Modellierung von Bauablaufstörungen | 109 |
| 3.4.3.1 | Störungen und Störungskategorien | 109 |
| 3.4.3.2 | Zwischenankunftszeiten und Störungs- dauern | 110 |
| 4. | Methodik zur Untersuchung der Bauproduktion | 114 |
| 4.1 | Szenariotechnik | 114 |
| 4.1.1 | Verwendung von Szenarien | 114 |
| 4.1.2 | Generierung von Störungsszenarien | 115 |
| 4.1.3 | Generierung von Zufallszahlen | 117 |
| 4.1.4 | Stochastische Ströme von Bauablaufstörungen | 118 |
| 4.2 | Modellierung von Bauablauf-Alternativen | 119 |
| 4.3 | Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Produktions- systems "Baustelle" | 122 |
| 4.3.1 | Definition und Fragestellungen der Sensitivitäts- analyse | 122 |
| 4.3.2 | Robustheitsuntersuchungen im Baubetrieb | 123 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5. | Entwicklung eines Bewertungskonzeptes | 126 |
| 5.1 | Begründung für das Bewertungskonzept | 126 |
| 5.2 | Anforderungen an das Bewertungskonzept | 127 |
| 5.3 | Baulogistische Bewertung | 129 |
| 5.3.1 | Durchlaufzeit | 129 |
| 5.3.2 | Termintreue | 134 |
| 5.3.3 | Personalauslastung | 135 |
| 5.4 | Monetäre Bewertung anhand des simulierten Nutzkostensatzes | 139 |
| 6. | Realisierung eines simulationsbasierten Verfahrens zur Unterstützung der Bauproduktion | 146 |
| 6.1 | Das objektorientierte Simulationsverfahren <i>OSim-BAU</i> | 146 |
| 6.2 | Aufbau des Simulationsverfahrens <i>OSim</i> | 148 |
| 6.2.1 | Integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen | 149 |
| 6.2.2 | Implementierung des Simulationsverfahrens | 151 |
| 6.2.3 | Notationsform der <i>UML</i> | 153 |
| 6.2.4 | Benutzungsoberfläche des Simulationsverfahrens | 155 |
| 6.3 | Aufbau eines Störungskatalogs für Bauablaufstörungen | 156 |
| 6.4 | Modellierung eines Bauablaufs in <i>OSim-BAU</i> | 160 |
| 6.4.1 | Modellierung von Durchlaufplänen | 160 |
| 6.4.2 | Modellierung baubetrieblicher Besonderheiten | 163 |
| 6.4.3 | Modellierung von Bauablaufstörungen | 167 |
| 7. | Systematische Simulationsstudien mit dem Verfahren <i>OSim-BAU</i> | 170 |
| 7.1 | Ziele der systematischen Simulationsstudien und Versuchsdesign | 171 |
| 7.1.1 | Ziele der Simulationsstudien | 171 |
| 7.1.2 | Versuchsdesign | 172 |
| 7.2 | Studie 1 "Sensitivitätsuntersuchung" | 176 |
| 7.2.1 | Aufgabenstellung der Studie 1 | 176 |
| 7.2.2 | Variation von Störungsparametern | 177 |
| 7.2.3 | Signifikante Einflüsse der Störungsparameter | 182 |
| 7.3 | Studie 2 "Robustheitsuntersuchung" | 189 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.3.1 | Aufgabenstellung der Studie 2 | 189 |
| 7.3.2 | Definition der Variationskoeffizienten | 190 |
| 7.3.3 | Simulationsergebnisse | 196 |
| 7.4 | Studie 3 "Bauablaufstrukturuntersuchung" | 202 |
| 7.4.1 | Aufgabenstellung der Studie 3 | 202 |
| 7.4.2 | Vernetzungs- und Parallelitätsgrad | 203 |
| 7.4.3 | Simulationsergebnisse | 204 |
| 7.5 | Verdichtung der Simulationsergebnisse zu Kernaussagen | 207 |
| 7.5.1 | Effekte von Bauablaufstörungen auf die Zielerreichungsgrade | 207 |
| 7.5.2 | Bedeutung der Variationskoeffizienten für Eingangs- und Ausgangsvariablen | 209 |
| 7.5.3 | Parallelitäts- und Vernetzungsgrad einer Bauablauf-Alternative | 209 |
| 8. | Praxiseinsatz des Verfahrens | 211 |
| 8.1 | Studie "Ausbauarbeiten im Reihenhausbau" | 211 |
| 8.1.1 | Beschreibung des Anwendungsbeispiels | 211 |
| 8.1.2 | Dokumentierte Störungsdauern und Verteilungstypen | 214 |
| 8.1.3 | Verifizierung und Validierung des Modells | 218 |
| 8.1.4 | Simulation von Bauablauf-Alternativen des Gewerks "Betonfertigteile" | 220 |
| 8.2 | Studie "Instandhaltung eines Kalkdrehrohrofens" | 225 |
| 8.2.1 | Beschreibung des Untersuchungsobjektes | 226 |
| 8.2.2 | Simulationsergebnisse | 230 |
| 8.3 | Schlussfolgerungen aus den Pilotstudien | 237 |
| 9. | Zusammenfassung und weiterführende Aspekte | 239 |
| 9.1 | Ergebnisse der vorliegenden Arbeit | 239 |
| 9.2 | Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten im Baubetrieb | 242 |
| 9.2.1 | Ganzheitlicher Planungsansatz im Sinne einer Digitalen Baustelle | 242 |
| 9.2.2 | Kapazitätsplanung im Multiprojektmanagement | 243 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 9.2.3 | Übergang vom Störungskatalog zur simulations- unterstützten FMEA | 244 |
| 10. | Quellenverzeichnis | 246 |
| 10.1 | Literatur | 246 |
| 10.2 | Verwendete Software | 278 |
| 11. | Anhang | 279 |
| 11.1 | Daten zur Simulation einer Baustelle | 279 |
| 11.1.1 | Grundlegender Bauablauf | 279 |
| 11.1.2 | Einteilung und Erfassung von Störungen | 280 |
| 11.1.3 | Ermittelte Ist-Zeiten "Reihenhausbau" | 282 |
| 11.1.4 | Durchlaufpläne "Reihenhausbau" | 305 |
| 11.2 | Modellierte Bauablauf-Alternativen | 313 |
| 11.2.1 | Durchlaufpläne zur Zusammenarbeit der Gewerke "Trockenbau" und "Elektroarbeiten" | 314 |
| 11.2.2 | Durchlaufpläne des Gewerks "Betonfertigteile" | 315 |
| 11.3 | Algorithmus zur Generierung von Störungsszenarien | 318 |
| 11.3.1 | Materialbedingte Störungen | 318 |
| 11.3.2 | Prozess- und personalbedingte Störungen | 319 |
| 11.4 | Daten zur Simulation von Instandhaltungsarbeiten | 320 |
| 11.4.1 | Durchlaufpläne der Simulationsstudie | 321 |
| 11.4.2 | Vollfaktorieller Versuchsplan | 323 |
| 11.5 | Simulationsergebnisse der Zusammenarbeit der Gewerke | 324 |
| 11.5.1 | Daten der Störungsszenarien | 326 |
| 11.5.2 | Variationen von Störungsparametern beim Ausgangsmodell | 327 |
| 11.5.3 | Simulationsergebnisse für gleich- und normal- verteilte Zwischenankunftszeiten | 328 |
| 11.5.4 | Ausgangsmodell versus Ablauf-Alternativen der Zusammenarbeit der Gewerke | 330 |
| 11.5.5 | Ergebnisse von Varianzanalysen | 332 |
| 11.5.6 | Signifikanz der Zielerreichungsgrade | 335 |
| 11.6 | Simulationsergebnisse der Studie "Ausbauarbeiten im Reihenhausbau" | 336 |
| 11.6.1 | Vernetzungs- und Parallelitätsgrade | 336 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 11.6.2 | Variationskoeffizienten der Eingangs- und Ausgangsvariablen | 338 |
| 11.7 | Simulationsergebnisse der Studie "Instandhaltung eines Kalkdrehrohrofens" | 339 |
| 11.8 | Begriffsdefinitionen zu Bauablaufstörungen | 341 |
| 11.9 | Zeitarten nach REFA | 342 |
| 12. | Verzeichnis der Formelzeichen | 344 |