

Digitale Optimierung der Bauplanung

J. Backhaus

DOI: <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201805141029-0>

*Dipl.-Ing. (bau) Jan Onne Backhaus, MBA
Institut für Geotechnik und Baubetrieb
Technische Universität Hamburg
onne.backhaus@tuhh.de*

Inhalt

1	Einleitung	24
2	Ansätze	24
	2.1 Modellbildung	25
	2.2 Implementierung	26
3	Monte-Carlo Simulation zur Vorhersage von Bauzeiten und –kosten	27
4	Optimierung	29
5	Zusammenfassung	30

1 Einleitung

Während die Bruttowertschöpfung in der deutschen Bauindustrie über die letzten 15 Jahre fast unverändert geblieben ist, stieg sie in der Service- und produzierenden Industrie stetig an.¹ Diesem Trend wird aktuell zum einen durch eine Modernisierung der operativen Managementmethoden auf der Baustelle begegnet. Zum anderen wird die Digitalisierung, insbesondere im Bereich des Building Information Modelling (BIM), vorangetrieben. Während die einen unter BIM vor allem mächtige Product Life Cycle Management Tools verstehen, sehen andere in BIM vor allem eine rechnergestützte Projektmanagementmethode. Gemeinsam haben die Ansätze, dass eine große Anzahl an Metadaten zu Bau und Bauablauf digital zur Verfügung steht. Dieser Beitrag baut auf einem früheren Beitrag² auf und stellt einen Ansatz vor, vorhandene Metadaten unter Verwendung der am Institut für Geotechnik und Baubetrieb entwickelten MATLAB Bibliothek „GBPlan“ wertschöpfend zu nutzen.

2 Ansätze

Die Verwendung von digitalen Methoden zur Verbesserung der Planung im Bauwesen wurde bereits vielfach untersucht. Die auch in diesem Beitrag beschriebene Monte-Carlo-Simulation (MCS)³ wird beispielsweise zur Analyse von Risiken in Bauprojekten eingesetzt.⁴ Zur Simulation von dynamischen oder zeitabhängigen Systemen können diskrete Simulationen eingesetzt werden.⁵ Hierbei ändern die Systeme ihre Zustände ereignis- oder zeitgesteuert. Beispiele sind Verkehrssimulationen⁶, Petri-Netze zur Simulation von Erdbauprozessen im Straßenbau⁷, ereignis-orientierte Ansätze zur Berechnung von Wartungszyklen im Tunnelbau⁸ oder die Simulation der Logistik auf einer Baustelle⁹. Die makroskopische Ebene wird durch System Dynamics¹⁰ beschrieben. Mit dieser Methode können sowohl ex ante als auch ex post Untersuchungen durchgeführt werden, weshalb sie sich zur Verwendung in Adjudikationsverfahren oder zur Risikoanalyse eignet.¹¹ Erste Untersuchungen zu dem Ableiten von Bauablaufplänen direkt aus CAD bzw. BIM Systemen¹² und modellbasierter Terminplanung¹³ wurden bereits durchgeführt. Die automatisierte Optimierung der Baustelleneinrichtung wurde bereits in späten 80er Jahren untersucht¹⁴. Verbesserte Ansätze durch evolutionäre Algorithmen werden derzeit erforscht.¹⁵ Die auch in diesem Schriftbeitrag verwendete Metra-

¹ Destatis (2007)

² Backhaus / Grabe (2018)

³ Allen (2011)

⁴ Flemming (2011)

⁵ Choi / Kang (2013), Franz (2011)

⁶ Rose (2003)

⁷ Chahrour (2006)

⁸ Conrads et al (2015)

⁹ Scheffer et al. (2014), Rahm (2016), Yu et al. (2017)

¹⁰ Forrester (1972)

¹¹ Rodrigues / Williams (1998), Rodrigues / Bowes (1996)

¹² Fahih et al (2016)

¹³ Chahrour (2006), Chahrour / Tulke (2011)

¹⁴ Tommelein (1988)

¹⁵ Azadivar / Wang (2000)

Potential-Methode baut auf der Graphentheorie auf und zählt zu einer der am häufigsten verwendeten Methoden in der Netzplantechnik im Bauwesen.¹⁶

2.1 Modellbildung

Es wurde ein theoretisches Modell für ein Produktionssystem für Baustellen entwickelt. Dieses wurde Ursprünglich zur Implementierung von Lean Construction Methoden entwickelt¹⁷ und ist in Abbildung 2 dargestellt. Den Kern des Modells bilden Prozesse. Ein Prozess wird immer als Produktionssystem aufgefasst. Dieses wandelt Input durch den Einsatz von Produktionsfaktoren in Output um. Der Input beinhaltet zum einen alle für den Bau benötigten Produktionsstoffe (beispielsweise 500 Ziegelsteine) zum anderen aber auch alle Vorbedingungen oder Vorprodukte (beispielsweise eine Baugrube). Innerhalb der Produktionssysteme können voneinander abhängige Arbeiten auftreten. So kann es die Herstellung einer Bodenplatte erforderlich machen, dass verschiedene Arbeiten durchgeführt werden. Beispielsweise folgt auf das Ausheben der Baugrube deren Sicherung, bevor dann die Bodenplatte hergestellt wird. Hierbei kann das System durch äußere, schwer kontrollierbare, exogene Einflussfaktoren oder dem System eigene endogene Einflussfaktoren beeinflusst werden.

Das zuvor beschriebene Model wurde nach der Metra-Potential-Methode (MPM) in MATLAB implementiert. Formal handelt es sich um einen schlingenfreien, gerichteten, schlichten Graphen, dessen Knoten durch eine Menge homogener, binärer Relationen miteinander verknüpft sind.¹⁸ Jeder Knoten des Graphen hat verschiedene Eigenschaften, von denen die wichtigsten nachstehend aufgeführt sind:

ID : Eindeutiger Bezeichner.

FAZ : Frühester möglicher Anfangszeitpunkt des Prozesses.

FEZ : Frühester möglicher Endzeitpunkt des Prozesses.

SAZ : Spätester möglicher Anfangszeitpunkt des Prozesses.

SEZ : Spätester möglicher Endzeitpunkt des Prozesses.

DAUER : Dauer des Prozesses, wobei gilt: $Dauer\ d = FEZ - FAZ = SEZ - SAZ$.

Die Verbindungspfeile zwischen den Knoten können um minimale bzw. maximale Abstände ergänzt werden (Abbildung 1). Ein so modellierter Graph wird auch als Netzplan bezeichnet.¹⁹

¹⁶ Zimmernann et al. (2006), Noosten (2013)

¹⁷ Bregenhorn (2015)

¹⁸ Pahl / Damrath (2000)

¹⁹ Noosten (2013).

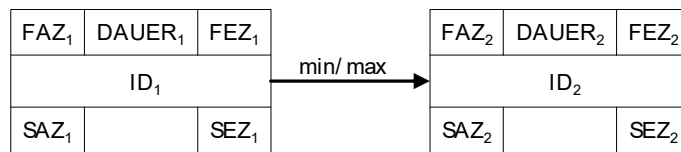


Abbildung 1: Netzplanknoten. Dargestellt sind zwei voneinander abhängige Netzplanknoten, ihre Eigenschaften, sowie die Eigenschaften der verbindenden Kante.

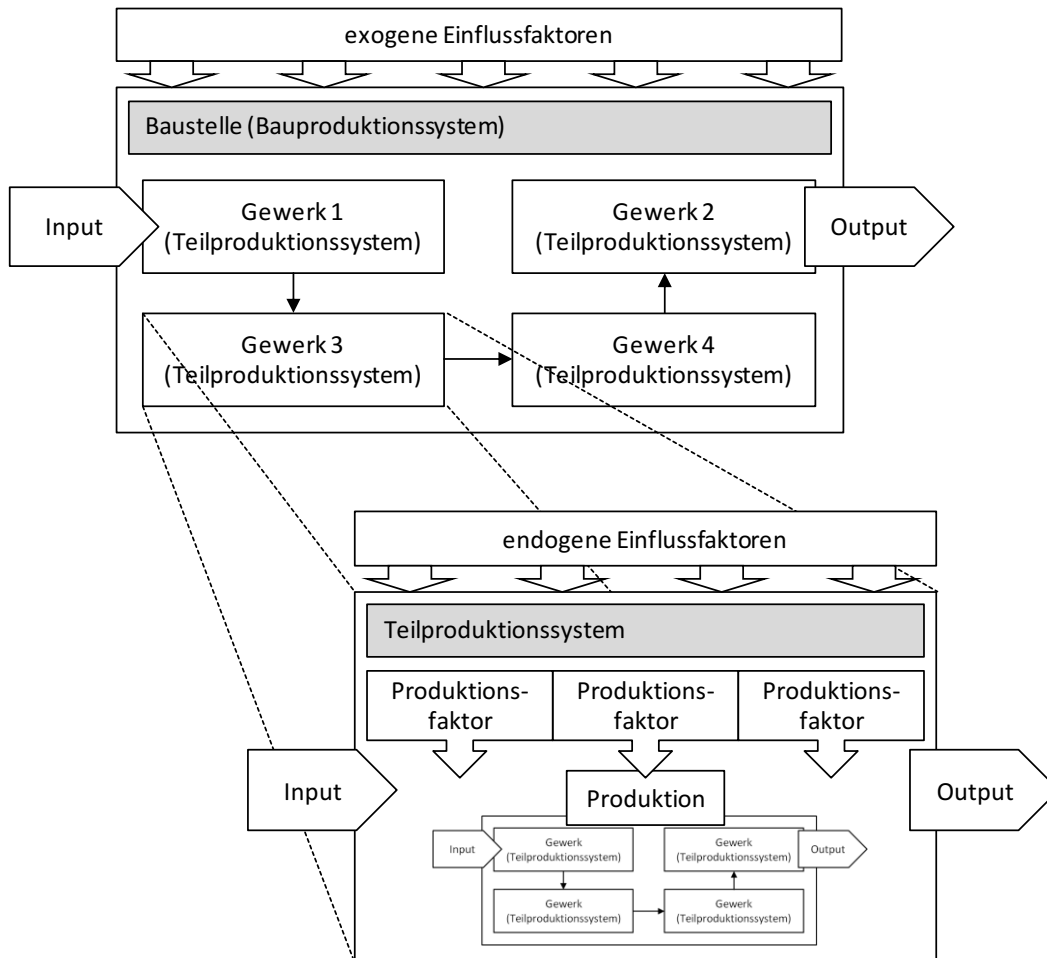


Abbildung 2: Generisches Prozessmodell auf der Basis von Bregenhorn (2015). Dargestellt ist das Zusammenspiel von Bauproduktionssystem und Teilproduktionssystemen, Produktionsfaktoren und der Einfluss exogener und endogener Einflussfaktoren.

2.2 Implementierung

Das zuvor beschriebene Modell wurde in MATLAB implementiert. Zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit wurde ein objektorientierter Modellierungsansatz gewählt. Teile des Klassendiagramms sind in Abbildung 3 dargestellt. Ein Produktionssystem besteht immer aus mehreren Prozessen. Diese sind entweder Hauptprozesse oder Verbindungsprozesse, die diese in Relation zueinander setzen. Die Klasse Arbeitssystem kapselt die Funktionalität von Teilproduktionssystemen. Diese Art der Modellierung erlaubt es, Prozesse beliebig fein aufzuspalten. So könnte auf der obersten Ebene der Prozesse „Baugrube erstellen“ stehen. Dieser wäre in der nächsten Sub-Ebene unterteilt in: „Mutterboden entfernen“, „Grube ausheben“, „Grube sichern“ und „Anker setzen“. Eine weitere Untergliederung des Teilprozesses „Grube ausheben“ in: „Bagger nimmt auf“, „Bagger dreht“, „Bagger lädt ab“, „Bagger dreht“, usw. ist möglich. Je nach Problemstellung können so unterschiedliche Dimensionen des

Bauprozesses und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem untersucht werden. Bauproduktionsfaktoren sind den Bauprozess beeinflussende Faktoren. Diese sind als Ableitungen von der Elternklasse „Bauproduktionsfaktoren“ implementiert. Arbeitsobjekte sind die zu bearbeitenden Objekte, wie beispielsweise ein Erdkörper. Arbeitsmittel können Baumaschinen aber auch Werkzeuge sein, die wiederum von Menschen bedient werden. Durch die individuellen Eigenschaften der Bauproduktionsfaktoren (beispielsweise die Erfahrung und Motivation bei Menschen oder die Schaufelgröße einer Baumaschine) wird der Bauprozess direkt beeinflusst.

3 Monte-Carlo Simulation zur Vorhersage von Bauzeiten und –kosten

Mit dem so implementierten Model lassen sich bereits erste, statische Bauzeitenschätzungen berechnen. Das Problem bei dieser Art der Simulation ist, dass die anfangs ermittelten Einflussgrößen über die Berechnung hinweg unverändert bleiben. Während eine solche Annahme bereits in der stationären Industrie nur unter bestimmten Bedingungen zulässig ist, erscheint sie unter in-stationären Bedingungen als unzulässig. Bauprozesse zeichnen sich durch eine sehr hohe Variabilität der Prozessdauern aus,²⁰ da exogene und endogene Faktoren das Produktionssystem beeinflussen. Als Folge einer Verzögerung eines einzelnen Prozesses werden häufig auch die mit ihm verbundenen Prozesse beeinflusst. Beispielsweise ergab eine Studie eine durchschnittliche, wöchentliche Planerfüllungsrate von nur 60% in den untersuchten Gewerken.²¹ Diese Verzögerungen entstehen häufig aus einer Abweichung der angenommenen Leistungswerte. Diese werden entweder auf der Basis von Erfahrungswerten oder unter Zuhilfenahme von Tabellen- oder Formelwerken geschätzt.²² Hierbei wird unterschlagen, dass die Prozessdauer eben nicht statisch ist, sondern einer dem Planer in der Regel unbekanntem Verteilungsfunktion folgt. Diesem Problem begegnet „GBPlan“, indem eine MCS durchgeführt wird. Die Bauproduktionsfaktoren werden hierbei nicht statisch als diskreter Wert, sondern als Zufallsvariable modelliert. Die MCS berechnet den Bauablaufplan immer wieder mit neuen, zufällig aus den angenommenen Verteilungen gezogenen Einflusswerten. Auf diese Weise wird eine Vielzahl an möglichen Szenarien berechnet. In dem einen Szenario einer Baugrubenerstellung dauert beispielsweise das Ausheben im letzten Drittel etwas länger, in einem anderen Szenario geht das Setzen der Erdanker ganz besonders schnell von statten. Bei ausreichend vielen Berechnungen ergibt sich so eine Verteilungskurve von Gesamtbauzeiten für die Baustelle. Diese wird statistisch ausgewertet. Ergab die Vorhersage aus der statischen Berechnung beispielsweise eine Bauzeit von 100 Tagen und liegt der Median der MCS bei 105 Tagen, so kann davon ausgegangen werden, dass die 100 Tage bei mehr als der Hälfte der möglichen Szenarien nicht zu erreichen sind. Es kann also schon während der Planung eine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit derselben getroffen werden. Neben einer Einschätzung des Risikos lassen sich ebenso Chancen statistisch beziffern und so gezielt fördern. Eine solche Chancen-Risiko-Analyse

²⁰ Koskela, (1999), Lange / Nübel (2016/2017)

²¹ Ballard / Howell (1998)

²² z.B. Girmscheid (2003), Singh (1993), Steinmetzger (2010)

stellt eine sinnvolle Ergänzung der Projektplanung dar.²³ Darüber hinaus erlaubt diese Methode eine baubegleitende Überwachung der Planung. Diese ist in der Lage zu alarmieren, bevor sich zum Beispiel als vernachlässigbar erscheinende Planungsänderungen zu signifikanten Planungsänderungen aufschaukeln. Im Kontakt zu den Stakeholdern der Baustelle, insbesondere dem Kunden, erlauben die Ergebnisse zudem das Visualisieren der Bauzeit als Zielkegel (Abbildung 4).

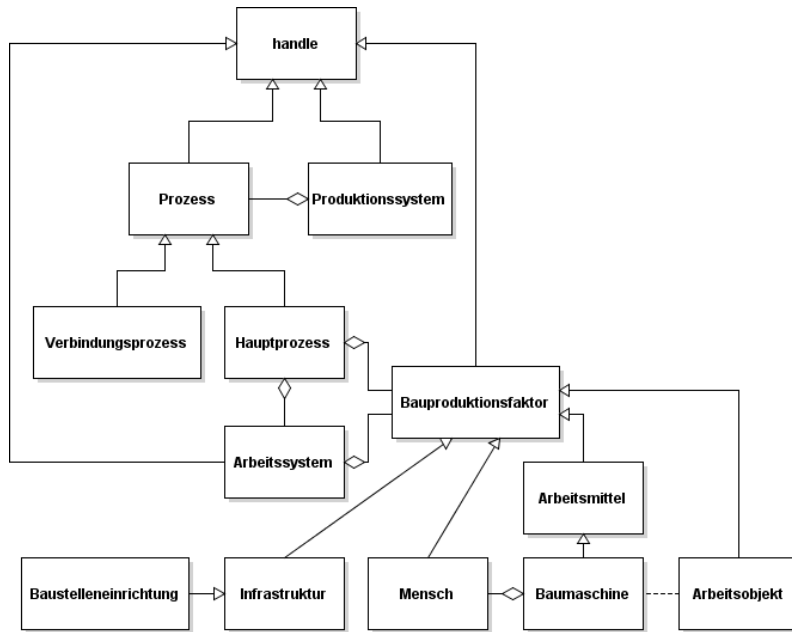


Abbildung 3: „GBPlan“ Klassendiagramme. Dargestellt sind die Abhängigkeiten der Prozesse und Bauproduktionsfaktoren.²⁴

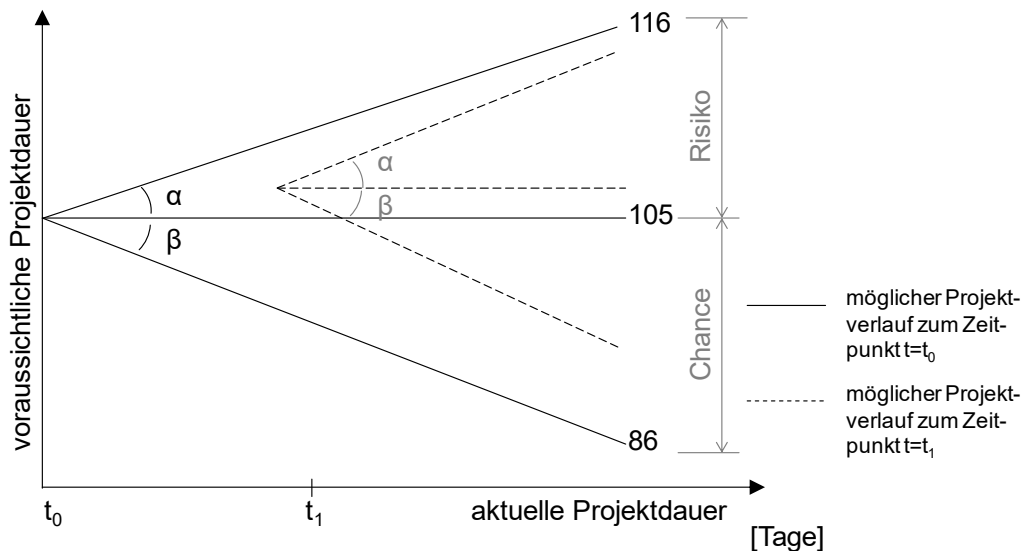


Abbildung 4: Zielkegel. Dargestellt ist ein Bauzeitenzielkegel. Dieser gibt die mittlere, die maximale und die minimale Bauzeit aller in der MCS untersuchten Szenarien an.²⁵

²³ Bea et al. (2008)

²⁴ Bildquelle: Backhaus / Grabe (2018)

²⁵ Eigene Darstellung nach Backhaus / Grabe (2018)

Anstatt eine unseriöse aber diskrete Schätzung der Projektdauer abzugeben werden hier die Ergebnisse der MCS abgebildet. Das heißt, es wird neben der angenommenen, mittleren Projektdauer ebenso die maximale und die minimale Projektdauer der in der MCS untersuchten Szenarien angezeigt. Mit fortlaufender Zeit realisieren sich Risiken und Chancen, was zu einem Steigen/Sinken der angenommenen, mittleren Projektzeit führt (waagerechte, gestrichelte Linie in Abbildung 4). Da über die Zeit mehr Wissen über das Projekt, z. B. Leistungswerte oder Bodenparameter, bekannt werden und die Zahl der Chancen/Risiken sinkt, verringern sich auch die Winkel α und β . α ist hierbei ein Maß für das dem Projekt inhärenten Risikos und β für die inhärenten Chancen. Ziel einer guten Bauplanung sollte es also auch immer sein, bei sinkender voraussichtlicher Projektdauer, die Winkel α und β möglichst klein werden zu lassen. Als weiterer Wert zur Bemessung der Güte einer Planung kann neben den Chancen/Risiken-Winkeln der Quotient aus Projektdauer D_h und durchschnittlicher Projektdauer nach MCS $D_{MCS,\emptyset}$ herangezogen werden (Gl. 1, 2).

$$G = \frac{D_h}{D_{MCS,\emptyset}} \quad (1)$$

mit

$$G \begin{cases} < 1, & \text{dominierende inhärente Risiken} \\ = 0, & \text{optimal} \\ > 1, & \text{dominierende inhärente Chancen} \end{cases} \quad (2)$$

4 Optimierung

Für die weitere Entwicklung von „GBPlan“ ist die Implementierung einer multikriteriellen Optimierung durch evolutionäre Algorithmen geplant. Hierbei werden die Parameter der Bauplanung so lange verändert, bis ein Pareto-Optimum (Abbildung 5) in den Dimensionen Kosten und Dauer gefunden wurde. Evolutionäre Algorithmen sammeln die Parameter hierzu in einem Vektor \vec{x} und variieren diesen basierend auf mehreren Zielfunktionen $f_i(\vec{x})$. Da die Kosten und die Dauer miteinander gekoppelt sind, lässt sich keine eindeutige Lösung finden. Das Ergebnis ist ein Lösungsraum, der alle pareto-optimalen Lösungen enthält. Dies sind all jene Lösungen, bei denen die eine Lösungsdimension (beispielsweise Kosten) nicht verbessert werden kann, ohne dass sich die andere (beispielsweise Dauer) verschlechtert. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei dem gegebenen Problem kann der Parametervektor \vec{x} direkt aus der Nachbarschaftsmatrix der Bauablaufplanung abgeleitet und um Parameter wie beispielsweise die Mannstärke oder die eingesetzte Art und Anzahl der Maschinen ergänzt werden. Die Funktionsweise des evolutionären Algorithmus ist an die Biologie angelehnt. Als Beispiel soll zunächst das Genom einer Zelle dienen. Im Zuge der Evolution kommt es zunächst zur Selektion der stärksten Zellen bzw. derer Genome, indem aus einer Gruppe von Zellen die am wenigsten an die Umgebung angepassten sterben. Diese stärksten Zellen werden nun miteinander (re)kombiniert, wodurch neue Zellen entstehen, deren Eigenschaften sich von jenen der Elternzellen unterscheiden. In einigen Fällen kommt es desweiteren zu Mutationen. Das bedeutet, dass sich Teile des Genoms bzw. die Eigenschaften einiger Zellen willkürlich ändern. Die auf diese Weise neu entstandene Generation wird dann wieder durch Selektion ausgedünnt bevor der nächste Vermehrungszyklus mit Rekombination, Mutation und Selektion beginnt. Als Folge vieler dieser Zyklen entsteht mit der Zeit eine an

die Selektionskriterien angepasste, das heißt optimierte, Zelle. In Analogie zu der Evolution von Zellen wird der Parametervektor \vec{x} bzw. das Genom aus der Bauablaufplanung gebildet. Die Selektion erfolgt über Zielfunktionen, auf deren Basis die besten Versionen der Bauplanung selektiert werden. Um bewerten zu können welche Version besser und welche schlechter ist, führt die Zielfunktion mit jedem der Individuen einer neuen Generation eine MCS durch und wertet diese aus.²⁶

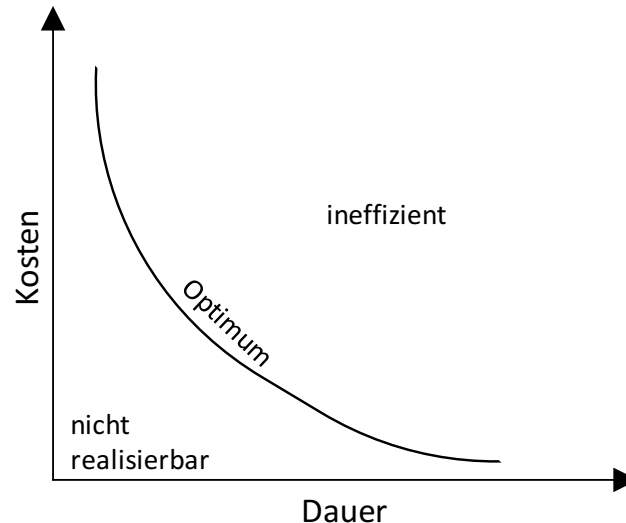


Abbildung 5: Pareto-Optimum. Dargestellt ist das Pareto-Optimum von Kosten und Dauer einer Baumaßnahme. Links von der Kurve liegen nicht realisierbare Lösungen, rechts von der Kurve Lösungen die ineffizient sind und auf der Kurve Lösungen bei denen eine Dimension (b

5 Zusammenfassung

Die Digitalisierung hat bereits in anderen Industrien zu einem signifikanten Zuwachs der Wertschöpfung geführt. In diesem Kontext stellt sich die Frage, wie diese Effekte auf die Bauindustrie bzw. auf Baustellen übertragen werden können. Eine Möglichkeit wurde in diesem Beitrag vorgestellt. Durch die numerische Analyse der Bauplanung mit „GBPlan“, einer für diese Untersuchung am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg entwickelten Klassenbibliothek für MATLAB, lässt sich die Bauplanung analysieren. Die Ergebnisse eignen sich zur Identifikation von Chancen und Risiken, um so deren Realisierung gezielt zu beeinflussen. Desweiteren erlaubt das Tool eine baubegleitende Planungsüberwachung, die Alarm schlägt, wenn zunächst ungefährlich erscheinende, aktuelle Ereignisse zu einer signifikanten Veränderung der Bauzeit oder des Budgets führen können. Zukünftig sieht die Entwicklung von „GBPlan“ die Implementierung automatisierter Optimierungsfunktionen unter Verwendung von multikriterieller, evolutionärer Optimierung vor. Diese sollen die automatisierte Optimierung der Ressourcenplanung und des Bauablaufes ermöglichen.

²⁶ Multikriterielle, evolutionäre Algorithmen werden seit längerem vom Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg zur Optimierung in der Geotechnik eingesetzt. Zur weiterführende Lektüre wird auf die Veröffentlichungen des Institutes verwiesen, d.h. insbesondere Seitz / Grabe (2018) und Kinzler (2011) verwiesen.

Literaturverzeichnis

Allen, Theodore T. (2011).

Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling. Voting Systems, Health Care, Military, and Manufacturing. 1. Aufl. London: Springer.

Azadivar, Farhad / John Jian Wang (2000).

Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. In: International Journal of Production Research 38 (17), S. 4369–4383.

Backhaus / Grabe (2018)

„Numerisch basierte Prozessanalyse. In: Workshop: Digitale Infrastruktur & Geotechnik 2018 (DIG2018), Hrsg.: J. Grabe, Tagungsband, 20.-21.03.2018, Hamburg, Deutschland

Ballard, Glenn / Gregory A. Howell (1998).

Shielding production: Essential step in production control. In: Journal of Construction Engineering and Management 124.1, S. 11–17.

Bea, Franz Xaver / Steffen Scheurer / Sabine Hesselmann (2008).

Projektmanagement. 1. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius.

Bregenhorn, Tobias (2015).

Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Management im Spezialfall Erdbau. Diss. Karlsruhe: Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie.

Chahrour, Racha (2006).

Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. (Veröffentlicht in Schriftreihe Bauwirtschaft, Forschung 7). Diss. Kassel: Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.

Chahrour, Racha / Jan Tulke (2011).

Anbindung der Simulation an eine BIM-Umgebung, Chancen an Anforderungen im Vergleich zur Terminplanung. In: Simulation von Unikatprozessen. Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis. 2. IBW-Workshop. Hrsg.: Volkhardt Franz. Schriftreihe Bauwirtschaft. Institut für Bauwirtschaft (IBW). Kassel, Germany: Kassel University Press, S. 63–80.

Choi, Byoung Kyu / Donghun Kang (2013).

Modeling and Simulation of Discrete-Event Systems. 1. Aufl. Hoboken, NY: John Wiley & Sons.

Conrads, Alena et al. (2015).

Prozesssimulation zur Analyse von Wartungsstrategien im maschinellen Tunnelbau. In: Simulation in Production and Logistics. Hrsg. von Markus Rabe und Uwe Clausen. Stuttgart, Germany: Fraunhofer IRB Verlag, S. 1–11.

Destatis (2017).

Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung 2016. Inlandsproduktberechnung Lange Reihen ab 1970. Report. Fachserie 18 Reihe 1.5. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Fahihi, Vahid / Kenneth F. Reinschmidt / Julian H. Kang (2016).

Objective-driven and Pareto Front analysis: Optimizing time, cost, and job-site movements. In: Automation in Construction 69, S. 79–88.

Flemming, Christian (2011).

Simulation für Risikoprognosen von Bauprojekten. In: Simulation von Unikatprozessen. Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis. 2. IBW-Workshop. Hrsg.: Volkhardt Franz. Schriftenreihe Bauwirtschaft. Institut für Bauwirtschaft (IBW). Kassel, Deutschland: Kassel University Press, S. 121–141.

Forrester, Jay W. (1972).

Grundzüge einer Systemtheorie. Ein Lehrbuch. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler.

Franz, Volkhardt, Hrsg. (2011).

Simulation von Unikatprozessen. Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis. 2. IBW-Workshop. Schriftenreihe Bauwirtschaft. Institut für Bauwirtschaft (IBW). Kassel, Germany: Kassel University Press.

Girmscheid, Gerhard (2003).

Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse. 4. Aufl. Berlin: Springer.

Kinzler, Steffen (2011).

Zur Parameteridentifikation, Entwurfs- und Strukturoptimierung in der Geotechnik mittels numerischer Verfahren. In: Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb 23. Diss. Hamburg: Hamburg Techn. Univ. Hamburg-Harburg, Inst. für Geotechnik und Baubetrieb.

Koskela, Lauri (1999).

Management of production in construction: a theoretical view. In: Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-7). Hrsg. von Iris D. Tommelein und Glenn Ballard. Berkeley, CA, S. 241–252.

Lange, Alexander / Konrad Nübel (2016/2017).

Lean-Construction: Wie kann Wertschöpfungssteigerung in der Planungs- und Bauwirtschaft vorankommen? In: Bauingenieur. Die richtungsweisende Zeitschrift um Bauingenieurwesen. VDI-Bautechnik, S. 105–106.

Noosten, Dirk (2013).

Netzplantechnik. Grundlagen und Anwendungen im Bauprojektmanagement. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Science + Business Media.

Pahl, Peter Jan / Rudolf Damrath (2000).

Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik. 1. Aufl. Berlin: Springer.

Rahm, Tobias (2016).

Simulation-Based Evaluation of Disturbances of Production and Logistic Processes in Mechanized Tunneling Operations. Diss. Bochum: Department of Civil und Environmental Engineering, Ruhr-Universität Bochum.

Rodrigues, AG und TM Williams (1998).

System dynamics in project management: assessing the impacts of client behaviour on project performance. In: Journal of the Operational Research Society 49, S. 2–15.

Rodrigues, Alexandre / John Bowers (1996).

The role of system dynamics in project management. In: International Journal of Project Management 14.4, S. 213–220.

Rose, Martin (2003).

Modellbildung und Simulation von Autobahnverkehr. Diss. Hannover: Universität Hannover.

Scheffer, Markus et al. (2014).

Jobsite Logistics Simulation in Mechanized Tunneling. In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Hrsg. von A. Tolk et al., S. 1843–1854.

Seitz, Karlotta / Jürgen Grabe (2018).

Einsatzmöglichkeiten der multikriteriellen Optimierung im digitalen Bauen. In: Workshop Digitalisierung in Infrastruktur und Geotechnik (DIG2018). Hrsg. von Jürgen Grabe. Hamburg, Deutschland.

Singh, Jagman (1993).

Heavy Construction. Planning, Equipment and Methods. 1. Aufl. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.

Steinmetzger, Rolf (2010).

Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten für ereignisorientierte Simulationsmodelle im Baubetriebswesen. In: Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten. Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen. Tag des Baubetriebs 2010. (25. März 2010). Hrsg. von Hans-Joachim Bargstädt. Schriftenreihe der Professur Baubetrieb und Bauverfahren. Bauhaus-Universität Weimar, S. 111–118.

Tommelein, Iris D. / Raymond E. Levitt / Barbara Hayes-Roth (1988).

Sightplan: An artificial intelligence tool to assist construction managers with site layout. In: Conference: 6th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. (6th International Symposium on Automation and Robotics in Construction). Stanford University, S. 340–347.

Yu, Jia et al. (2017).

Probabilistic Risk Analysis of Diversion Tunnel Construction Simulation. In: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 32, S. 748–771.

Zimmermann, Jürgen / Christoph Stark / Julia Rieck (2006).

Projektplanung. Modelle, Methoden, Management. 1. Aufl. Berlin: Springer.

