

Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Hochbau

V. Berkhahn, F. Berner, H. Kutterer, V. Schwieger, J. Hirschner, I. Rehr, N. Rinke, J. Schweitzer

Zusammenfassung Gleichbleibende oder verbesserte Qualität bei reduzierten Kosten ist nicht nur im Hochbau einer der Leitsätze. Dieses Ziel ist unter anderem durch Automation von Prozessen oder zumindest Teilprozessen, gezielte Qualitätssicherung und konfliktfreie Überbrückung der Schnittstellen zwischen Gewerken und Berufsgruppen zu erreichen. Eine entscheidende Komponente ist dabei die Geometrie. Zur Bestimmung und Überprüfung geometrischer Elemente sind ingenieurgeodätische Mess- und Auswerteprozesse effizient und mit gesicherter Qualität in die Bauprozesse zu integrieren. Hiermit beschäftigt sich das Forschungsprojekt EQUIP, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Dessen Ziele und aktueller Stand werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Es werden zunächst die verschiedenen Hierarchiestufen eines Hochbauprozesses allgemein diskutiert, z.B. Vorgang, Teilvorgang und Vorgangsstufe. Darauf aufbauend wird ein Beispielprozess, die „Hochhauskernerstellung mittels Selbstkletterschalung“, in Teilvorgänge zerlegt und mit Hilfe eines Stellen-Transitions-Petri-Netzes modelliert. Die Schnittstellen zur Ingenieurgeodäsie werden aufgezeigt. Zur Vorbereitung der Effizienzoptimierung werden ein Laufzeit- und ein Kostenmodell aufgestellt, um unter Nutzung der Petri-Netze hinsichtlich der beiden Ziele „Zeit“ und „Kosten“ opti-

mieren zu können. Außerdem wird, um die geometrische Qualität sichern zu können, ein Zweischichten-Qualitätsmodell mit Merkmalen und Parametern entwickelt, das in die Petri-Netz-Modellierung integriert ist.

Efficiency optimization and quality control of engineering geodesy processes in civil engineering

Abstract Constant or improved quality at reduced costs is a guiding principle not only in building construction. This may be reached by automation of processes or sub-processes, specific quality assurance and bridging of interfaces among crafts and professional groups. One decisive component is the geometry, especially with respect to quality. In order to determine and control geometric elements, measurement and evaluation processes of engineering geodesy have to be integrated into the construction processes. In this paper the objectives and the current status of the research project equip dealing with this task are presented.

Different hierarchy levels of a building construction process are generally discussed, such as process and sub-process. Based hereon an example process, the construction of high-rise building cores using self-climbing formwork, is chosen. The sub-processes are modeled with the help of place-transition Petri nets. The interfaces with respect to engineering geodesy are presented. To prepare the target “optimization of efficiency” a time and a cost model are created. These models can be used to optimize with respect to cost or time with the help of Petri nets. Besides, a 2-level quality model was designed including characteristics and parameters to assure the quality of the geometry in the future. The model is integrated into the Petri nets.

1 Einleitung

Im Bauwesen und damit auch im Hochbau sind die Anforderungen an die geometrische Qualität in den letzten Jahren infolge technischer Notwendigkeiten und zunehmender Automation von Bauabläufen deutlich gestiegen. Zur Einhaltung der geometrischen Qualität trägt die Ingenieurgeodäsie wesentlich bei: sie liefert die Ist-Maße und einen Vergleich mit den Soll-Maßen während des Baufortschritts. Auch darüber hinaus, beispielsweise bei der Überprüfung von Toleranzen, kann die Messung geometrischer Größen zur Qualitätsmessung und -sicherung beitragen. Es bleibt festzustellen, dass sich im Bauwesen bislang kein umfassendes Qualitätsmodell etabliert hat, das über Toleranzen hinausgeht. Erste Ansätze werden zurzeit im Projekt „Development of a Real Time Quality Support System for the Houses Construction Industry (QuCon)“ [1] auf europäischer Ebene anwendungsorientiert für den Wohnhausbau verfolgt. Daneben beschäftigt man sich in dem „Forschungsverbund Virtuelle Baustelle (FORBAU)“ [2] praxisnah mit dem Thema Qualität im Wesentlichen im Bereich Straßenbau.

Hochbauprozesse haben ein hohes Automatisierungspotenzial. Das computerintegrierte Bauen (CIC) verbindet dabei Bau- und Informationstechnologie und behandelt den ge-

PD Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn

Institut für Bauinformatik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner

Institut für Baubetriebslehre
Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer

Geodätisches Institut Hannover
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Joachim Hirschner

Institut für wirtschaftliches und technisches
Immobilienmanagement – IWTI GmbH, Stuttgart

Dipl.-Ing. Ilka Rehr

Geodätisches Institut Hannover
Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. Nils Rinke

Institut für Bauinformatik
Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. Jürgen Schweitzer

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
Universität Stuttgart

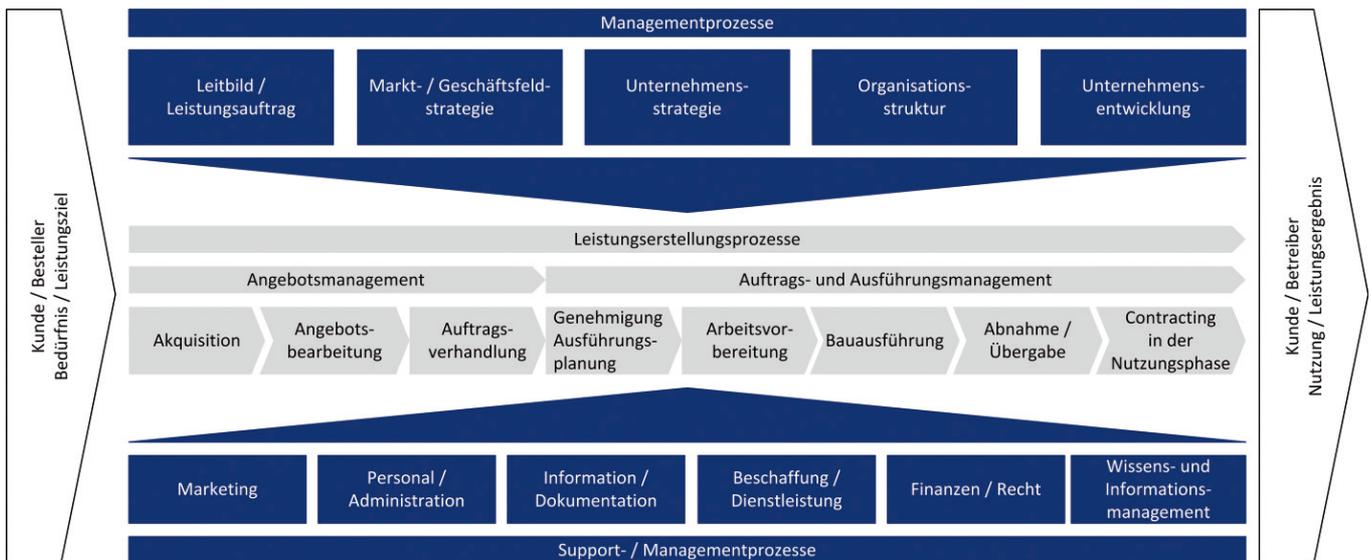


Bild 1. Prozesse aus Sicht eines Bauunternehmens (vgl. [4])
 Fig. 1. Processes from the perspective of a construction company (see [4])

samen Bauprozess integral [5]. Folglich bedarf auch der Hochbauprozess der effizienten, qualitätssichernden und automatisierten Integration der ingenieurgeodätischen Prozesse auf Grundlage einer adäquaten Prozessmodellierung und eines umfassenden Qualitätsmodells. Effizienz kann dabei als Kosteneffizienz verstanden werden und trägt in diesem Falle dazu bei, dass bei gleichbleibender Qualität die Kosten der ingenieurgeodätischen Leistungen reduziert werden können. Bei einer vollständigen Integration ist es sogar denkbar, die Kosten des Gesamtprozesses durch gezielt erhöhten Aufwand für die ingenieurgeodätischen Arbeiten zu verringern.

Deshalb wird das DFG-Forschungsvorhaben „EQUIP – Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Hochbau“ von den Autoren bearbeitet. Zum aktuellen Zeitpunkt sind typische Hochbauprozesse und deren Schnittstellen mit der Ingenieurgeodäsie analysiert, der Beispielprozess „Hochhauskernerstellung mittels Selbstkletterschalung“ identifiziert, Petri-Netze zur Modellierung etabliert sowie die Grundlagen der Effizienzoptimierung mittels genetischer Algorithmen und der Qualitätsmodellierung und deren Integration in die Petri-Netze gelegt. Über diese Projektinhalte wird nachfolgend berichtet.

2 Prozesse im Hochbau

2.1 Typische Prozesse im Hochbau

Im Rahmen dieses Beitrags wird der Prozessbegriff als Bezeichnung für strukturierte Abläufe verwendet. Bild 1 zeigt eine solche Betrachtungsweise unterschiedlicher Prozesse innerhalb eines Gesamtbauvorhabens, wie es beispielswei-

se das Erstellen eines Bürogebäudes darstellt, aus Sicht eines Bauunternehmens. Das Vorhaben gliedert sich hierzu in Management-, Leistungserstellungs-, Support- und Ressourcenprozesse.

Die einzelnen Prozesse beinhalten alle notwendigen Arbeitsschritte, die zur Umsetzung einzelner Teilaufgaben im Rahmen des Gesamtprojektes von Bedeutung sind, wobei die Arbeitsschritte hierzu nicht zwingend sequenziell ablaufen müssen. Durch Überlappung einzelner Arbeitsschritte ist ein paralleles Vorgehen möglich, wodurch erhebliche Zeitersparnisse und Wirtschaftlichkeitsverbesserungen erzielt werden können.

Unter dem Begriff „Bauprozess“ versteht man in der Regel den eigentlichen Leistungserstellungsprozess hinsichtlich einer Baumaßnahme. So soll er auch in diesem Beitrag verstanden werden. Eine projektbezogene Gliederung ergibt sich in Anlehnung an die Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI). Bei der Erstellung eines Bauwerks sind die in Summe erforderlichen Ablaufschritte, unterteilt in Makro- und Mikro-Ablaufschritte, zu unterscheiden. Diese Differenzierung erfolgt gemäß der Vorgaben des REFA-Verbandes für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V., [5] der 1924 als Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung gegründet wurde. Nach REFA sind die für den Gesamtablauf einer Maßnahme erforderlichen Ablaufschritte, wie Bild 2 zeigt, zu gliedern.

Hierbei entspricht der Gesamtablauf der eigentlichen Projektaufgabe, der Teilablauf dem Teilprojekt und die Ablaufstufe bildet die Projektstufe ab. Demzufolge kann die dargestellte Struktur für jedes zu realisierende Projekt herange-

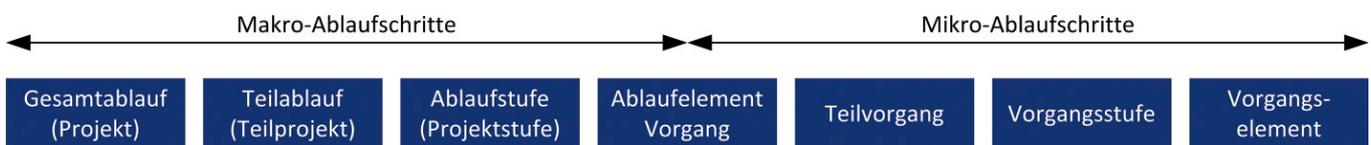


Bild 2. Ablaufschritte nach REFA
 Fig. 2. Steps in accordance with REFA

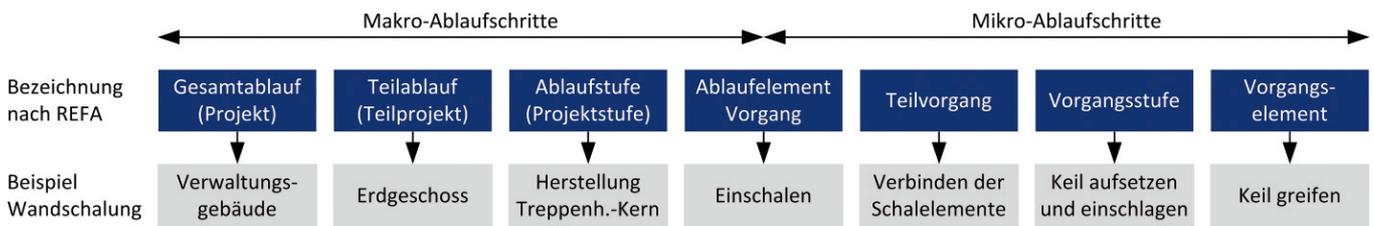


Bild 3. Ablaufschritte am Beispiel Wandschalung (vgl. [6])
 Fig. 3. Steps in the example of a wall formwork (see [6])

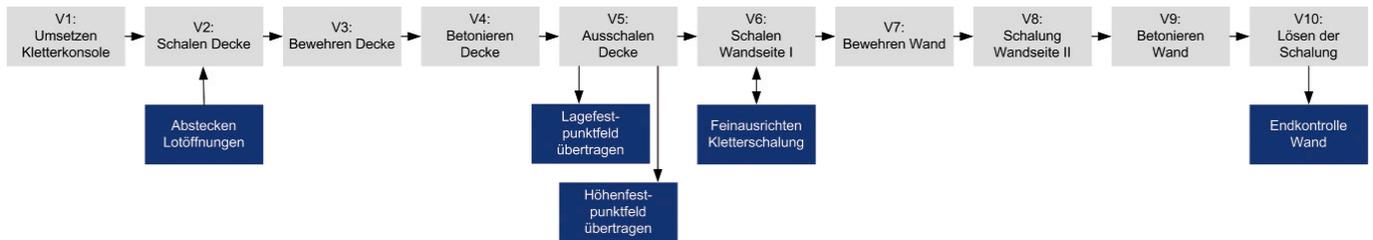


Bild 4. Vorgänge der Kletterschalung
 Fig. 4. Operations of the climbing formwork

zogen werden. Für das Schalun eines Treppenhaukerns können beispielsweise exemplarisch die Ablaufschritte nach Bild 3 angeführt werden.

Der Vorgang stellt in diesem Zusammenhang die feinste Gliederung der Makroebene dar und bildet den Übergang zwischen Makro- und Mikro-Ablaufschritten ab. Es handelt sich um denjenigen Abschnitt eines Arbeitsablaufs, der eine konkrete Ausführung eines Arbeitsauftrages darstellt und der sich im Hinblick auf das Gesamtprojekt entsprechend häufig wiederholt. Er setzt sich – auf der Mikroebene – aus mehreren Teilvorgängen zusammen, die ihrerseits aus unterschiedlichen Vorgangsstufen bestehen. Vorgangsstufen bilden den Abschnitt eines Teilvorganges ab, der eine in sich geschlossene Folge von Vorgangselementen umfasst. Ein solches Vorgangselement ist das kleinste Element der Mikro-Ablaufschritte. Weder in seiner Beschreibung noch in seiner zeitlichen Erfassung kann das Vorgangselement weiter unterteilt werden.

Im Hochbau wird eine potentielle Qualitätssteigerung bei der Bauausführung durch ein optimiertes Schnittstellenmanagement und die bessere Integration der baubegleitenden Ingenieurvermessungsaufgaben gesehen. Es wird deshalb untersucht, wie im Hinblick auf die interdisziplinären Schnittstellen, beispielsweise zwischen Hochbau und Maschinbau, unterschiedliche Maßtoleranzen zu einem beachtlichen Zeit- und Kostenproblem führen können. So muss z. B. ein Aufzugsbauer seine Aufzugsanlage individuell an die im jeweiligen Stockwerk vorzufindenden Gegebenheiten anpassen, um die beim Rohbau entstandenen Ungenauigkeiten zu korrigieren. Das hier vorgestellte Forschungsprojekt betrachtet dies am Bauprozess der Selbstkletterschalung, die schwerpunktmäßig im Hochbau, hier z. B. bei Hochhäusern, Treppenhaus- und Aufzugsschächten oder Hochhauskernen, zum Einsatz kommt. Dabei ist der Kletter- und Schalungsprozess ein immer wiederkehrender Arbeitsablauf, an dem konkret der Bauprozess und die zu integrierenden ingenieurgeodätischen Arbeitsabläufe exemplarisch dargestellt werden können. Die hieraus gewonnenen Ergebnisse können auf Gebäude mit variierenden Gebäudegrundrissen übertragen werden.

2.2 Schnittstellen zur Ingenieurgeodäsie

Von besonderer Bedeutung im Rahmen dieses Beitrags sind die Schnittstellen zwischen Bauwesen und Geodäsie, insbesondere um die an das Bauwesen und damit indirekt auch an die Ingenieurgeodäsie gestellten Anforderungen hinsichtlich Qualität und Effizienz nachhaltig erfüllen zu können.

Gerade bei Hochhäusern besteht die Schwierigkeit des Bauens darin, dass der Kern bzw. das Gebäude verschiedenen äußeren Bedingungen wie Wind, Sonne, Lasten und Setzungen ausgesetzt ist. Speziell bei besonders hohen Gebäuden, wie beispielsweise beim Burdsh Chalifa Tower (ehemals Burdsh Dubai), ist eine deutliche geometrische Abweichung von der Vertikalachse anzutreffen. Dementsprechend liegt das Hauptaugenmerk der Bauingenieure und Geodäten auf einer möglichst frühzeitigen Erkennung und Korrektur von Unstimmigkeiten, mit dem Ziel, das interdisziplinäre Schnittstellenmanagement zwischen Bauingenieuren und Geodäten zu optimieren und die baubegleitenden ingenieurgeodätischen Aufgaben besser in den Bauprozess zu integrieren.

In diesem Beitrag wird beispielhaft das Vorrücken einer Selbstkletterschalung mit Galgenkonstruktion an einem Hochhauskern beschrieben, wobei die Teilabläufe nach REFA für das Betonieren und Vorrücken herausgestellt werden. Dabei ist nicht zu vernachlässigen, dass es sich hierbei um theoretische Arbeitsabläufe handelt, die so in der Praxis nicht immer möglich sind, da beispielsweise die Planung des Bauablaufs oder die vorgesehene Wandgeometrie des Gebäudes zu Änderungen der Arbeitsabläufe führen können. Zu diesem Zweck sind die Teilabläufe dahingehend zu untersuchen, inwieweit vor bzw. nach einem Teilvorgang entsprechende Absteckungs- und Kontrollmessungen durchzuführen sind. Um einen immer wiederkehrenden Arbeitsablauf gewähren zu können, werden vereinfachungshalber die Teilvorgänge der Obergeschosse ab dem Geschoss 3 näher betrachtet (vgl. Bild 4), da diese im Gegensatz zu den ersten beiden Geschossen für alle weiteren identisch sind. Innerhalb eines solchen Teilablaufes besteht der Vorgang 1 zunächst im Umsetzen der Kletterkonsole in den nächsten

Betonierabschnitt. Anschließend wird in den Vorgängen 2 bis 4 die Decke eingeschalt, bewehrt und schließlich betoniert. Hierzu ist beim Vorgang 2, dem Einschalen der Decken, darauf zu achten, dass Aussparungen in Form von sogenannten Lotöffnungen an den vorgesehenen Stellen abgesteckt werden. Diese ziehen sich vom Erdgeschoss bzw. von der Bodenplatte bis zum aktuellen Betonierabschnitt und dienen der Übertragung von Lage- und Höhefestpunkten.

Weitere ingenieurgeodätische Leistungen kommen im Vorgang 5 beim Ausschalen der Decke zum Einsatz. Hierbei werden die beim Einschalen berücksichtigten Aussparungen in Form von Lotöffnungen frei, die nun zur Übertragung der Lage- und Höhenfestpunktfelder dienen.

Im Vorgang 6 beim Schalen der Wandseite I erfolgt normalerweise bei den Kletterschalungen das Einmessen und Überprüfen der Schalungseinheiten. Da es sich im untersuchten Fall um eine Selbstkletterschalung mit Galgenkonstruktion handelt, bei der die Wandseite I neben der eigentlichen Funktion der Wandschalung zudem als Randabschalung zum Betonieren der Decken verwendet wird, erfolgt an dieser Stelle das Überprüfen und gegebenenfalls das erneute Einmessen des Schalelements durch einen Geodäten.

In den Vorgängen 7 bis 9 wird im weiteren Verlauf die Wand bewehrt, die Wandseite II eingeschalt und der Beton in die mit Ankern verbundenen Schalungselemente eingebracht.

Erst nach dem Ausschalen der Wand in Vorgang 10 durch Lösen und Ausbauen der Schalungsanker und dem Zurückschieben der Schalungselemente in die ursprüngliche Arbeitsposition kann durch einen Geodäten die Endkontrolle erfolgen, um möglichst frühzeitig Unstimmigkeiten erkennen und korrigieren zu können.

3 Petri-Netze zur Modellierung von Prozessen im Hochbau

Um die Effizienzoptimierung und die Qualitätsmodellierung einschließlich deren Sicherung methodisch vollständig darstellen und durchführen zu können, müssen sowohl die Hochbauprozesse als auch die ingenieurgeodätischen Prozesse modelliert werden. Durch die Komplexität der Prozesse im Hochbau ergeben sich verschiedene Anforderungen an dieses Prozessmodell. Es muss u. a. eine einfache und automatisierte Simulation sowie die Modellierung parallel ablaufender Prozesse ermöglichen. Außerdem müssen unterschiedliche Hierarchiestufen wie Vorgang, Teilvorgang und Vorgangsstufe (vgl. Bild 2) darstellbar sein. Da viele Prozessabläufe im Hochbau wiederkehrend sind, sollte das Modell diese Prozessabläufe generalisieren und mehrfach verwenden können.

Schließlich muss das Modell eine Möglichkeit bereitstellen, zeitliche Aspekte zu berücksichtigen. Um all diese Anforderungen zu gewährleisten, bietet sich die Nutzung von Petri-Netzen an.

3.1 Einführung zu Petri-Netzen

Das Petri-Netz wurde von Carl Adam Petri als Erweiterung der endlichen Automaten eingeführt. Durch die Möglichkeit der Nebenläufigkeit von Systemen und das Abbilden von Transportprozessen findet dieses Modell heutzutage in vielen Bereichen der Wissenschaft, z.B. in der Stoffstromanalyse, seinen Einsatz (z.B. [7]).

Ein Petri-Netz setzt sich aus vier Komponenten zusammen. Dazu gehören Stellen bzw. Plätze, Transitionen, Marken bzw. Token und Kanten. *Stellen* oder *Plätze* modellieren passive Komponenten eines Prozesses. In Stellen können Marken gelagert oder gespeichert werden. Eine Stelle hat eine Kapazität, die angibt, wie viele Marken sie aufnehmen kann. Stellen werden in Petri-Netzen als Kreise dargestellt.

Transitionen modellieren die aktiven Komponenten eines Prozesses. In Transitionen können Marken transportiert werden. Das Ausführen einer Transition wird als Schalten bezeichnet. Wenn eine Transition geschaltet wird, werden die Marken der Stellen im Vorbereich einer Transition nach bestimmten Regeln in die Stellen des Nachbereiches bewegt. Transitionen werden in Petri-Netzen als Rechteck dargestellt.

Marken oder *Token* beinhalten Materialien oder Personal, die als Information auf einer Stelle liegen können. Durch den Transport von Marken werden der Ablauf eines Prozesses und die damit verbundenen Zustandsänderungen modelliert.

Kanten verbinden die Stellen mit den Transitionen und umgekehrt. Kanten können Restriktionen für das Schalten von Transitionen vorgeben, wie zum Beispiel eine Angabe, wie viele Marken über die Kante transportiert werden.

3.2 Modellierung von Prozessen

Es gibt unterschiedliche Arten von Petri-Netzen, in denen die in 3.1 vorgestellten Komponenten verschiedene Funktionen erfüllen können.

Bedingungs-Ereignis-Netz

Die ursprüngliche Art des Petri-Netzes wird als Bedingungs-Ereignis-Netz (B/E-Netz) bezeichnet. In einem B/E-Netz repräsentieren die Stellen die Bedingungen für Ereignisse, die ihrerseits durch Transitionen dargestellt werden. Besitzt eine Stelle eine Markierung, liegt eine Bedingung vor. Sind alle Bedingungen des Vorbereichs einer Transition erfüllt und ist der Nachbereich der Transition nicht durch eine Marke belegt, ist die Transition schaltbereit (vgl. Bild 5). Nach dem Schalten der Transition wandern die Marken in den Nachbereich der Transition. Diese Netzform eignet sich besonders um Prozesse zu modellieren, welche einen geringen Detaillierungsgrad und eine hohe Abhängigkeit untereinander besitzen.

Stellen-Transitions-Netz

In Stellen-Transitions-Netzen (S/T-Netzen) kann eine Stelle mehrere Marken aufnehmen. Die Anzahl der maximal aufzunehmenden Marken wird über die Kapazität der Stelle ausgedrückt. Weiter können über eine Kante mehrere Marken wandern. Wie viele es sind, wird über das Kantengewicht geregelt. Eine Transition ist schaltbereit, wenn die Anzahl der Marken im Vorbereich die Anforderungen der jeweiligen Kanten erfüllt und der Nachbereich genügend freie Plätze bereitstellt (siehe Bild 6).

Stellen-Transitions-Netze eignen sich besonders für die Modellierung von komplexen Prozessen, da neben dem Vollziehen eines Prozesses auch der zugehörige Informations-, Personal- und Materialfluss modelliert wird. Da bei Hochbauprozessen eine Modellierung der verfügbaren Ressourcen und der am Prozess beteiligten Personen von entscheidender Bedeutung ist, wurde für die Modellierung das Stellen-Transitions-Netz gewählt.

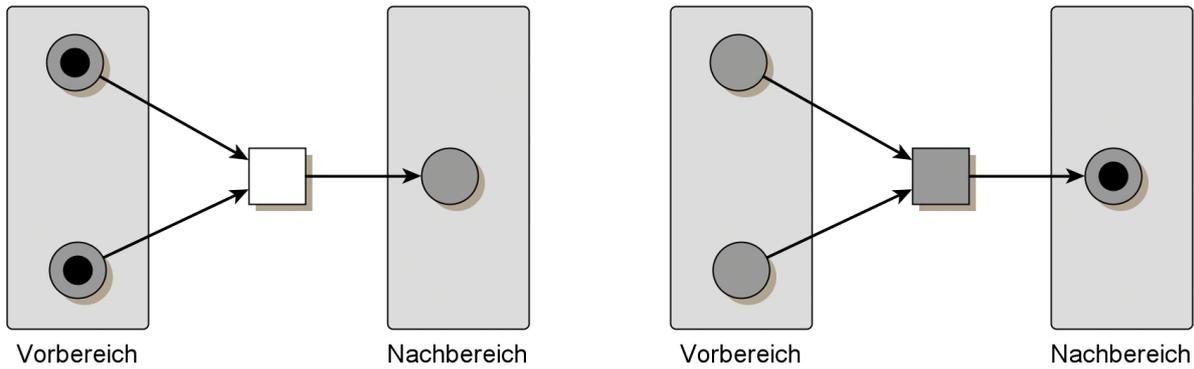


Bild 5. Bedingungs-Ereignis-Netz (links: vor dem Schalten der Transition, rechts: nach dem Schalten der Transition)
 Fig. 5. Condition-event-net (left: before firing, right: after firing the transition)

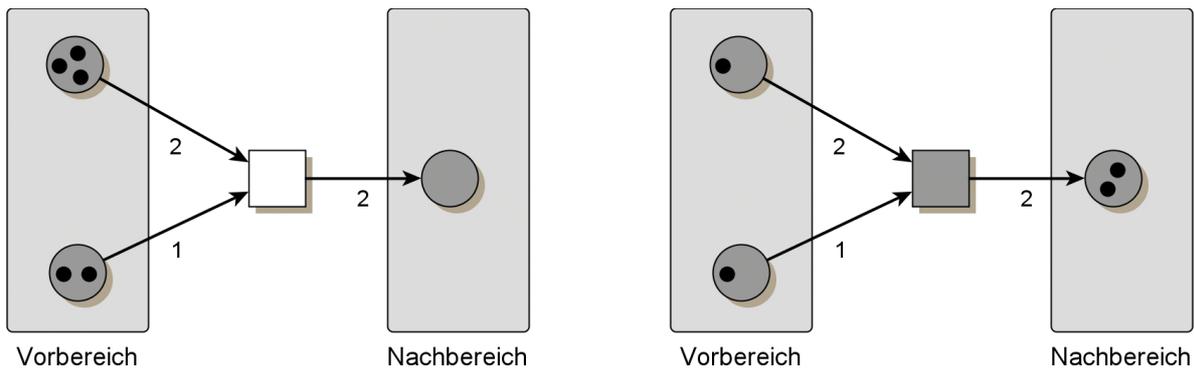


Bild 6. Stellen-Transitions-Netz (links: vor dem Schalten, rechts: nach dem Schalten der Transition)
 Fig. 6. Place-transition-net (left: before firing, right: after firing the transition)

3.3 Modellierung von Hochbauprozessen

Beschreibt man jeden Vorgang zur Erstellung eines Hochhauskerns mit dem Vorrücken einer Selbstkletterschalung als Transition, so kann man den Gesamtprozess beziehungsweise die verschiedenen Ablaufstufen nach Bild 4 mittels eines Stellen-Transitions-Netzes modellieren. Exemplarisch ist dies in Bild 7 für den Teilvorgang V6 aufgezeigt.

Wie man in Bild 7 erkennen kann, wird bei der Ausrichtung der Kletterschalelemente eine Kontrolle durch den Geodäten vollzogen. Dazu werden die zur Absteckung benötigten geometrischen Elemente vorbereitet (beispielsweise Bereitstellung von Soll-Koordinaten und Aufbau von Anschlusspunkten). Während die Kletterschalelemente ausgerichtet werden, wird das Messinstrument stationiert. Anschließend erfolgt eine Positionsbestimmung der Elemente, um die Abweichungen von den Sollwerten zu bestimmen.

Wenn diese Abweichungen die festgesetzten Toleranzwerte nicht überschreiten, kann der Teilvorgang abgeschlossen werden. Andernfalls ist eine Neu-Ausrichtung der Kletterschalung erforderlich und der Messvorgang wird wiederholt.

Die vollständige Modellierung eines Hochbauprozesses, der neben vielen weiteren Vorgängen eine mehrfache Modellierung des oben angesprochenen Einschaltvorgangs beinhaltet, erfolgt durch die Aneinanderreihung oder Parallelschaltung der Petri-Netze aller Teilvorgänge. Wenn eine Marke am Ende eines Petri-Netzes angekommen ist, wandert diese Marke auf die Anfangsstelle des folgenden Petri-Netzes und startet somit den nächsten Vorgang. Zur Modellierung zeitlicher Aspekte können die Transitionen entsprechend der Dauer ihrer Aktivität mit Zeitwerten belegt werden, so dass anschließend der Bauablauf simuliert und die Gesamtzeit

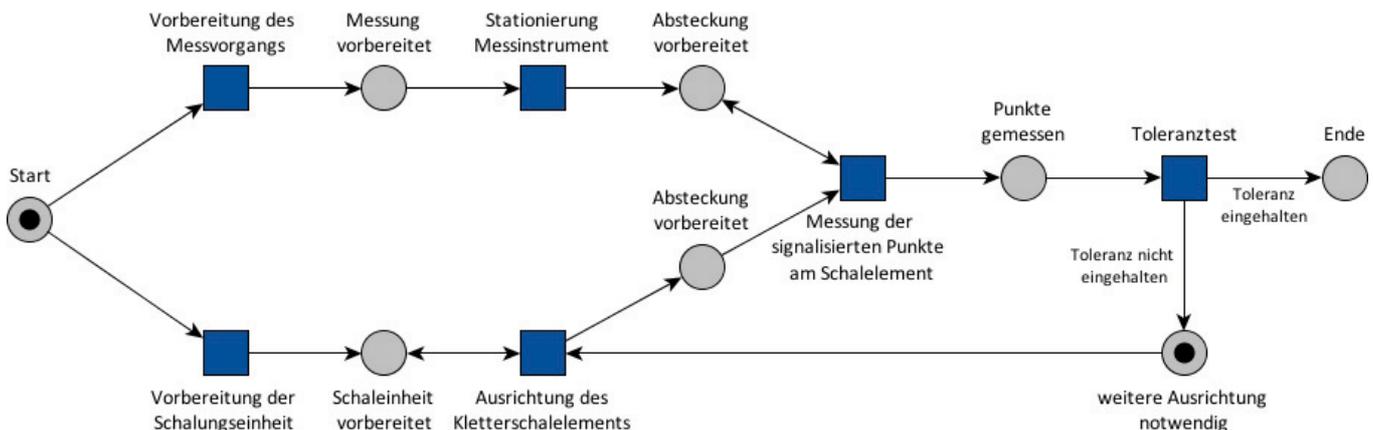


Bild 7. Stellen-Transitions-Netz des Einschaltvorgangs für eine Wandseite
 Fig. 7. Place-transition-net of the process of erecting formwork

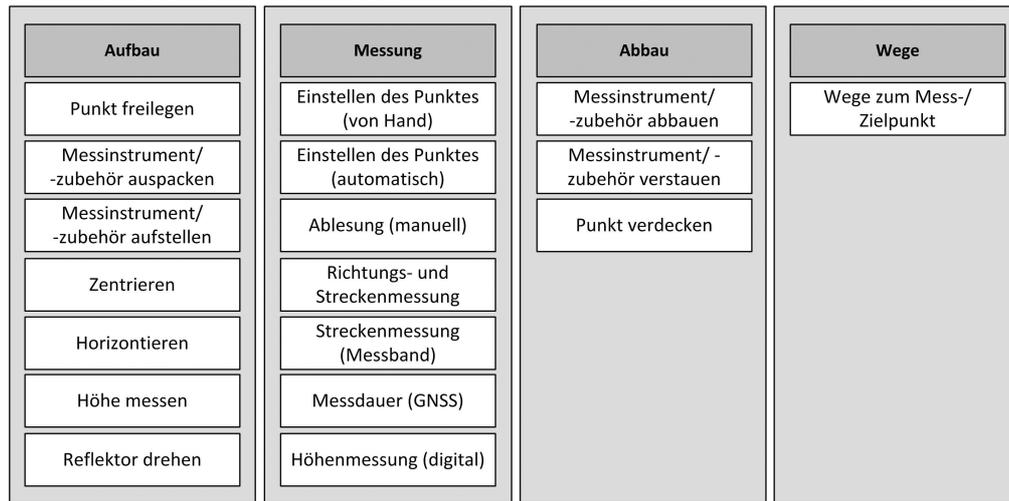


Bild 8. Laufzeitmodell eines Messprozesses
 Fig. 8. Run-time model of a measuring process

bestimmt werden kann. In [8] wurde eine einfache Möglichkeit aufgezeigt, wie man unterschiedliche Zeitwerte für eine Transition in Abhängigkeit der zu schaltenden Marken dynamisch bestimmen kann.

4 Effizienzoptimierung ingenieurgeodätischer Prozesse im Hochbau

Ingenieurgeodätische Prozesse/Vorgänge sind nach den Abschnitten 2.2 und 3.3 in die Hochbauprozesse beziehungsweise -vorgänge zu integrieren. Dies ist zurzeit noch nicht durchgängig erfolgt. Deshalb werden in diesem Kapitel und in Kapitel 5 zunächst die jeweiligen Grundlagen und die gewählten Ansätze dargestellt. Sie sind die Basis für die zukünftige Modellierung. Innerhalb dieses Kapitels wird in Anlehnung an die Theorie der Petri-Netze von Prozessen gesprochen. Dabei soll bewusst nicht zwischen den verschiedenen Hierarchiestufen unterschieden werden; als Prozesse können folglich Ablaufstufen, Vorgänge oder Teilvorgänge bezeichnet werden. Teilprozesse beziehen sich dann immer auf eine darunterliegende Stufe.

4.1 Kriterien zur Effizienzbewertung

In Anlehnung an die Effizienzbeurteilung von Produktionsprozessen und Softwareprodukten [9] wurden die *Dauer* und die *Kosten* als primäre Effizienzkriterien für die Bewertung von ingenieurgeodätischen Prozessen gewählt. Ein Mess- oder Auswerteprozess ist laufzeiteffizient, wenn die *Dauer* seiner Durchführung möglichst gering ist. Er ist kosteneffizient, wenn er möglichst geringe *Gesamtkosten* verursacht. Der *optimale Informationsfluss* (inkl. Datenfluss) zwischen den einzelnen Berufsgruppen wurde als sekundäres Effizienzkriterium eingeordnet. Dessen Betrachtung wird in der ersten Projektphase vernachlässigt, da in ihr schwerpunktmäßig die Effizienzbewertung und -optimierung von ingenieurgeodätischen Prozessen betrachtet werden soll.

Laufzeitmodell

Die Ermittlung der Dauer eines Mess- oder Auswerteprozesses erfolgt mithilfe eines Laufzeitmodells. Hierin werden alle Tätigkeiten aufgeführt und entsprechenden Kategorien zugeordnet. Ein Messprozess wird beispielsweise in die Ka-

tegorien Aufbau, Messung, Abbau und Wege untergliedert (vgl. Bild 8). Jeder Tätigkeit wird darin ihre Durchführungsdauer zugeordnet. Während der Simulation mit den Petri-Netzen wird beim Schalten einer Transition der Zeitaufwand der Tätigkeit aus dem Laufzeitmodell entnommen, der so zur Berechnung der Gesamtdauer des Prozesses beiträgt.

Kostenmodell

Sollen statt der Dauer eines ingenieurgeodätischen Prozesses die Gesamtkosten gering gehalten werden, ist es notwendig ein Kostenmodell aufzustellen, das alle Eingangsgrößen eines Prozesses erfasst und in Geldeinheiten umrechnet.

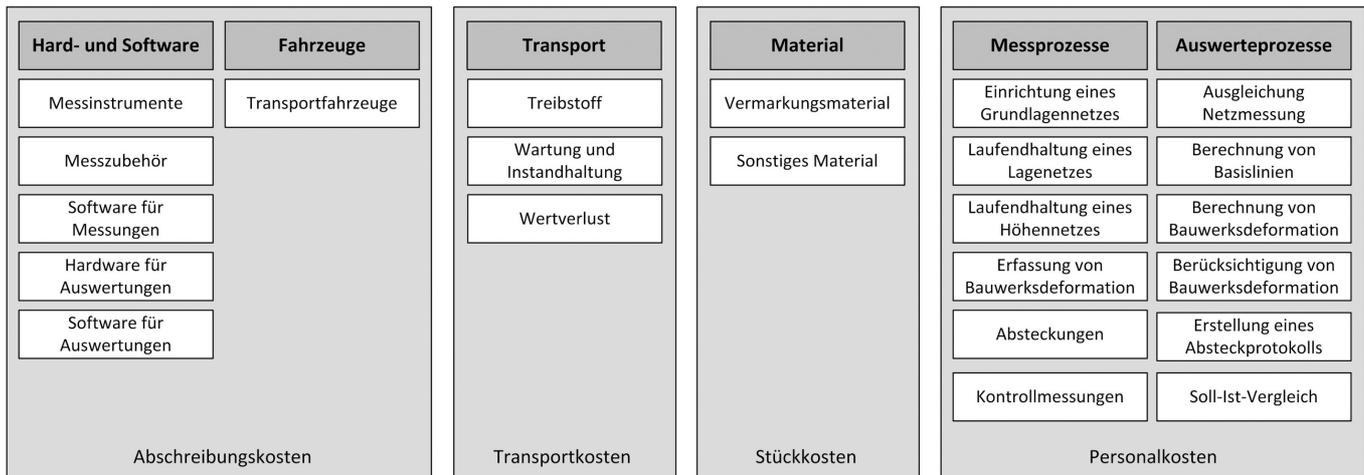
Innerhalb des Kostenmodells wird zwischen *planbaren* Kosten und *nicht-planbaren* Kosten unterschieden. Die planbaren Kosten sind im Vorfeld eines ingenieurgeodätischen Prozesses kalkulierbar, während die nicht-planbaren Kosten, die innerhalb eines realen Messprozesses auftreten können, vorher in ihrer Größenordnung allerdings nicht eindeutig abschätzbar sind. Hierzu zählen zum Beispiel Wartezeiten, die durch Störungen während des Bauprozesses entstehen, oder notwendige Reparaturkosten an Messinstrumenten. In Bild 9 ist das Kostenmodell der planbaren und nicht-planbaren Kosten dargestellt.

Nebenbedingungen für die Effizienzoptimierung

Zusätzlich zu den Kriterien „geringe Dauer“ oder „geringe Kosten“ können weitere Forderungen an die Effizienzoptimierung der ingenieurgeodätischen Prozesse gestellt werden. Hierzu gehören ein möglichst hoher *Integrationsgrad* und ein hoher *Automatisierungsgrad*. Ihre Maximierung kann neben der Senkung der Kosten oder der Dauer eine Rolle spielen.

Der *Integrationsgrad* gibt an, wie gut der ingenieurgeodätische Prozess in den Bauprozess eingegliedert ist. Das Ziel bei Einführung dieser Nebenbedingung ist die Verursachung möglichst geringer Kosten durch Wartezeiten von Bautrups und Baumaschinen. Es kann sinnvoll sein, den Personal- und Ressourceneinsatz für einen Mess- und Auswerteprozess zu erhöhen, wenn dadurch eine Verringerung der Wartezeitkosten der Bautrups erreicht wird. Hierfür sind die Kosten, die ohne den Einsatz zusätzlichen Personals

Planbare Kosten



Nicht-planbare Kosten

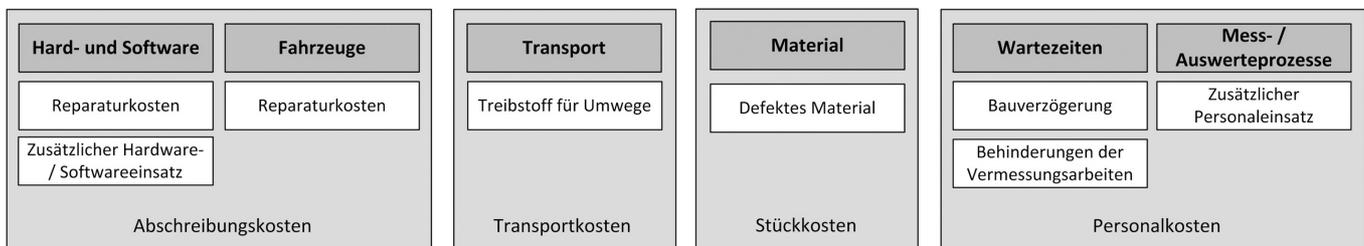


Bild 9. Kostenmodell
Fig. 9. Cost model

entstehen (Kosten aus der Planung), den Kosten mit zusätzlichem Personal (und daraus resultierenden geringeren Wartezeiten) gegenüberzustellen. Die veranschlagten Kosten können sich auf einen überschaubaren Teilprozess oder auf den gesamten Bauprozess beziehen. Bei komplexen Bauprozessen mit vielen nebenläufigen Tätigkeiten, die zu bestimmten Zeitpunkten voneinander abhängig sind, ist die Betrachtung des gesamten Bauprozesses vorzuziehen. Dann werden auch die Kosten und ggf. zusätzlichen Wartezeiten aller nachfolgenden Arbeiten mit einbezogen.

Der *Automatisierungsgrad* eines Mess- oder Auswerteprozesses gibt das Verhältnis der Prozessdauer zur Einsatzdauer des Personals innerhalb des Prozesses wieder. In der Prozessdauer sind sowohl manuelle als auch automatisierte Arbeitsschritte enthalten. Der Automatisierungsgrad ist dementsprechend hoch, wenn die Einsatzzeiten des Personals im Prozess gering sind. Ein hoher Automatisierungsgrad lohnt sich hauptsächlich bei Prozessen, die besonders häufig durchgeführt werden. Es ist zu beachten, dass die Hard- und Software, die für die automatisierte Durchführung von Teilprozessen benötigt werden, mit ihren Abschreibungskosten in die Kostenberechnung einzubeziehen sind.

4.2 Simulation verschiedener Szenarien mit Petri-Netzen

Durch die Modellierung der Teilprozesse des Bauablaufs mit Petri-Netzen wird die Grundlage für eine Simulation von Arbeitsprozessen geschaffen. Über die Durchführung von Simulationen der Bau-, Mess- und Auswerteprozesse kann der Geodät seine Einsatzzeiten und Ressourcen besser planen und die Ingenieurgeodäsie kann optimal in den Bauablauf

integriert werden. Außerdem steht den anderen Fachdisziplinen die Information zur Verfügung, was der Geodät auf der Baustelle zu tun hat. Und umgekehrt weiß der Geodät, welche Bauprozesse ablaufen und nach welchem Bauprozess er das nächste Mal benötigt wird. Petri-Netze für verschiedene Messaufgaben sind in [13] zu finden.

Für jede Transition kann mithilfe des vorgestellten Laufzeitmodells die Dauer der Durchführung bestimmt werden, wodurch sich am Ende des Petri-Netz-Durchlaufs eine Gesamtdauer des Prozesses ergibt. Hieraus können dann mit dem Kostenmodell die Gesamtkosten des Prozesses ermittelt werden.

Innerhalb der Simulation werden verschiedene Szenarien eines Messprozesses mit dem Ziel erzeugt, eine möglichst günstige bzw. schnelle Variante zu finden. Damit ist gemeint, dass eine bestimmte Messaufgabe zum Beispiel in einem Fall mit einer Person durchgeführt wird und im anderen Fall mit zwei Personen. Oder eine Höhenübertragung wird einmal tachymetrisch und ein anderes Mal geometrisch mit einem Nivellement durchgeführt. Dabei sind verschiedenste Szenarien denkbar und für jede Variante werden die Dauer und die Kosten aus der computergestützten Simulation ermittelt. Da häufig eine große Menge von Lösungen durch eine Reihe von unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Messinstrumenten, Personal, Messkonfigurationen usw. gebildet werden können, kann über eine Effizienzoptimierung die optimale Zusammenstellung der Eingangswerte zur Lösung der Messaufgabe gesucht werden. In [14] wird ein Verfahren für die Effizienzoptimierung einer tachymetrischen Netzmessung vorgestellt.

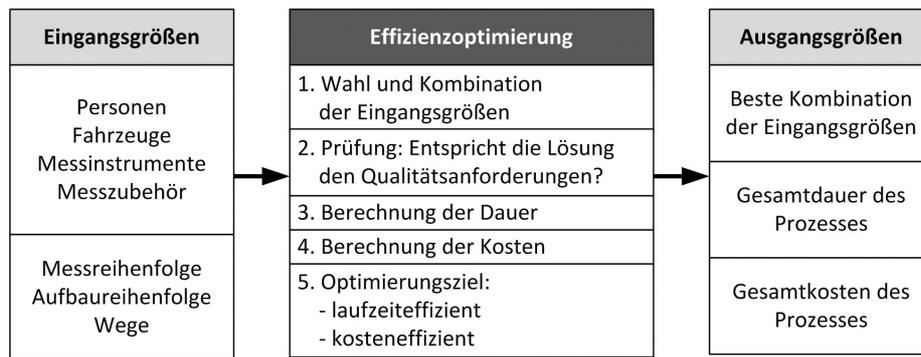


Bild 10. Effizienzoptimierung eines Messprozesses
 Fig. 10. Efficiency optimization of a measuring process

4.3 Verfahren zur Effizienzoptimierung

Bild 10 zeigt das Modell der Effizienzoptimierung eines Messprozesses. Die Effizienzoptimierung bildet die Verbindung zwischen den Eingangs- und den Ausgangsgrößen eines Messprozesses. Sie sorgt dafür, dass das gewählte Effizienzkriterium bestmöglich erreicht wird, indem verschiedene Kombinationen aus den Eingangsgrößen zusammengestellt und bewertet werden. Bevor die Berechnung der Dauer oder der Kosten erfolgt, wird überprüft, ob mit der gewählten Variante die geforderten Qualitätsanforderungen erreicht werden können. Ist dies der Fall, werden Dauer und Kosten berechnet. Falls die Lösung den Anforderungen nicht genügt, wird die Variante verworfen.

Mithilfe von Optimierungsverfahren wird eine schrittweise verbesserte Anpassung der Lösungen an das Effizienzziel erreicht. Am Ende der Effizienzoptimierung wird die Variante als Ausgangsgröße ausgegeben, die den Qualitätsanforderungen gerecht wird und das Effizienzziel (z.B. kosteneffizient) von allen erzeugten Szenarien am besten erfüllt. Als Optimierungsverfahren werden derzeit Genetische Algorithmen (GA) verwendet. GA gehören zur Gruppe der Evolutionären Algorithmen, die auf dem Prinzip der biologischen Evolution nach Darwin beruhen („survival of the fittest“). Sie werden hauptsächlich dann eingesetzt, wenn es sehr viele verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der Eingangswerte gibt. Eine detaillierte Beschreibung der Genetischen Algorithmen ist in [10], [11] oder [12] zu finden.

Da GA zur Gruppe der heuristischen Verfahren gehören, liefern sie zwar nicht unbedingt die optimale Lösung, sie sind aber in der Lage, in einer angemessenen Rechenzeit eine gute Lösung herauszufinden.

5 Qualitätsmodell für ingeniergeodätische Prozesse im Hochbau

5.1 Qualitätsmodellierung für ingeniergeodätische Prozesse im Bauwesen

Um die Qualität eines Produktes oder Prozesses beurteilen oder messen zu können, müssen in einem ersten Schritt Anforderungen definiert werden. Qualität ist als Grad der Erfüllung von Anforderungen definiert. Das Produkt, das in diesem Beitrag betrachtet wird, ist ganz allgemein ein Bauwerk. Hier werden alle Prozesse, die zur Geometrie des Gebäudes beitragen, betrachtet. Dabei soll zunächst nicht zwischen den verschiedenen Hierarchiestufen nach Bild 2 unterschieden werden. In der Regel ist jedoch davon auszugehen, dass ingeniergeodätische Prozesse als Vorgänge oder Teilvorgänge aufzufassen sind.

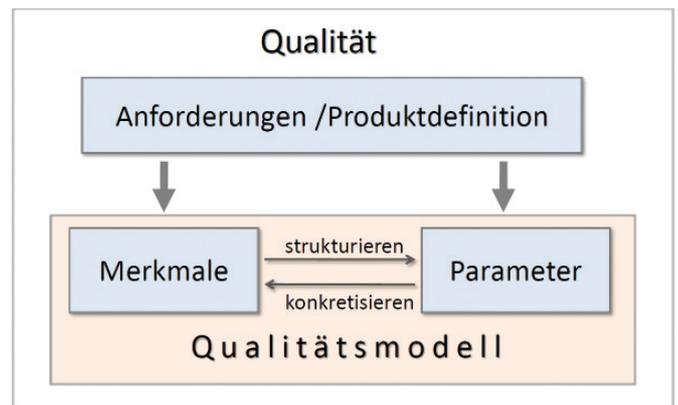


Bild 11. Zusammenhang der Qualitätsbegriffe
 Fig. 11. Context of terms of quality

Um Qualität beschreibbar und vergleichbar zu machen, ist ein Qualitätsmodell heranzuziehen. Dabei ist ein Qualitätsmodell als Begriffsrahmen aufzufassen, in dem der abstrakte Begriff Qualität stufenweise in Einzelaspekte aufgelöst und so konkretisiert wird [15]. Ein solches Qualitätsmodell gibt es weder für ingeniergeodätische Prozesse noch für Bauprozesse. Nur für die wenig komplexen Prozesse beim Wohnhausbau wird zurzeit ein anwendungsorientiertes Qualitätsmodell entwickelt [1]. Hier wird dagegen auf der Grundlage von Qualitätsmodellen aus Nachbardisziplinen wie der Software-Entwicklung [18] sowie der Verkehrstelematik [17] ein grundlegendes 2-Schichtenmodell entwickelt, das aus Qualitätsparametern und Qualitätsmerkmalen besteht, die nachfolgend allgemeingültig definiert werden.

Ein **Qualitätsmerkmal** ist ein inhärentes (ständiges) Merkmal eines Produktes oder Prozesses, das sich auf eine Anforderung bezieht. Die Qualitätsmerkmale bilden die oberste Hierarchiestufe eines Qualitätsmodells und sind rein qualitative Größen.

Über die **Qualitätsparameter** erfolgt eine Konkretisierung der Qualitätsmerkmale, wobei mehrere Parameter für ein Merkmal herangezogen werden können. Zu jedem Parameter können konkrete Messwerte bestimmt werden, die die jeweils vorhandene Qualität numerisch festlegen.

In Bild 11 ist der Zusammenhang schematisch dargestellt.

Aktuelle Qualitätsparameter im Hochbau und in der Ingenieurgeodäsie

Sowohl in der Geodäsie als auch im Bauwesen wird zurzeit jeweils vorrangig ein ausgezeichneter Qualitätsparameter genutzt. Im Bauwesen werden Anforderungen anhand von

Maßtoleranzen T (z.B. nach [18]) definiert, die eine absolute Ober- und Untergrenze angeben, innerhalb derer sich die Messwerte bewegen dürfen (Korrektheitsmaß, vgl. Tabelle 5.1). Im Gegensatz dazu werden in der Geodäsie die Anforderungen an geometrische Elemente mit Standardabweichungen σ nach [19] angegeben, die definierte Streuungen um den Soll-Wert beschreiben (Genauigkeitsmaß, vgl. Tabelle 5.1). Da ingenieurgeodätische Prozesse in Bauprozesse integriert werden sollen, muss ein Zusammenhang zwischen Standardabweichungen und Toleranzen hergestellt werden (siehe z.B. [20]). Zu beachten ist, dass der Zusammenhang über die Konfidenzintervalle herzustellen ist. Dieser gibt einen Bereich an, in dem sich die Messwerte mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit befinden. Das Verhältnis zwischen der Standardabweichung von Messwerten und der Maßtoleranz ist folglich gegeben durch

$$\sigma = \frac{T \sqrt{1 - (1 - p)^2}}{2k} \quad (5.1)$$

wobei k als Quantil der entsprechenden Verteilungsfunktion (in der Regel Normalverteilung) aufzufassen ist. Bei vorliegender Normalverteilung und einem Vertrauensniveau von 95% entspricht k näherungsweise einem Wert von 2. Die Größe p gibt den Anteil der Vermessungstoleranz an der Maßtoleranz an und nimmt in der Praxis Werte zwischen 0,1 < p < 0,5 an. Weitere Ausführungen zu diesem Thema sind beispielsweise in [20] zu finden.

Entwickeltes Qualitätsmodell

Neben der Standardabweichung und Maßtoleranz, die die Merkmale Genauigkeit und Korrektheit konkretisieren, sind bezogen auf Anforderungen (im Hochbau) weitere Merkmale (und Parameter) notwendig. In **Tabelle 1** sind Anforderungen aufgeführt, auf deren Grundlage Merkmale definiert werden können.

Hier wird zwischen primären und sekundären Anforderungen unterschieden. Die primären Anforderungen und die sich daraus ergebenden Merkmale und Parameter betreffen direkt die Geometrie des Bauwerks. Die sekundären Anforderungen dagegen sind Anforderungen, die zwar mit geometrierelevanten ingenieurgeodätischen Messungen in Zusammenhang stehen, aber diese Geometrie nicht direkt qualitativ beschreiben. Weitere Parameter neben „Standardabweichung“ und „Maßtoleranz“ sind z.B. „Anzahl fehlender Elemente“ (Vollständigkeit), „Störanfälligkeit“ (Zuverlässigkeit) und „Zeitverzug“ (Pünktlichkeit). Die Merkmale dienen der Beschreibung von Produkten, von Prozessen oder von beiden; die Parameter können nur zur Produkt- oder Prozessbeschreibung eingesetzt werden. Auf eine vollständige und detaillierte Beschreibung aller Parameter wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Es sei auf zukünftige Veröffentlichungen [21] verwiesen.

Tabelle 1. Qualitätsmerkmale für ingenieurgeodätische Prozesse im Bauwesen
Table 1. Quality characteristics for engineering geodesy processes in civil engineering

Primäre Anforderungen	Merkmal	Beschreibung
Einhaltung der Toleranzen und der absoluten Lage und Höhe im Raum	Genauigkeit	gibt den Grad der Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem wahren bzw. plausibelsten Wert an
	Korrektheit	gibt das Ausmaß der Übereinstimmung des Messprozesses bzw. Messergebnisses mit den geplanten Prozessen bzw. Elementen an
Vollständigkeit der Elemente im Rohbau	Vollständigkeit	gibt das Ausmaß des Vorhandenseins sämtlicher zur Gestaltung der räumlichen Geometrie erforderlichen Elemente an
Sekundäre Anforderungen		
Zuverlässigkeit der Messprozesse / Messmittel	Zuverlässigkeit	gibt die Verlässlichkeit einer dem Produkt / Prozess zugewiesenen Funktion in einem Zeitintervall an
Einhaltung der zeitlichen Vorgaben	Pünktlichkeit	gibt das Ausmaß der Einhaltung der zeitlichen Vorgaben an

5.2 Integration des Qualitätsmodells in die Petri-Netz Modellierung

Da für die Prozessmodellierung Petri-Netze genutzt werden und diese für die Effizienzoptimierung eine entscheidende Rolle spielen (siehe Kapitel 3 und 4), ist es unverzichtbar, das Qualitätsmodell in die Modellierung mit Petri-Netzen zu integrieren. Jeder Prozessschritt (Transition) kann beliebig viele Parameterwerte erzeugen/ausgeben. Nach oder während des Ablaufes eines ingenieurgeodätischen Prozesses kann somit die Qualität durch Parameter beschrieben werden. In einem nächsten Schritt können diese Parameterwerte bewertet werden, d.h. es kann anhand von Schwellwerten überprüft werden, ob die geforderte Qualität eingehalten worden ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur Integration des Qualitätsmodells und für die Qualitätssicherung. In **Bild 12** ist die Verknüpfung von Petri-Netz und Qualitätsmodell prinzipiell skizziert. Es wird hierbei nochmals deutlich, dass die Qualitätsparameter nach (**Bild 12** oben) oder während (**Bild 12** unten) eines ingenieurgeodätischen Prozesses erzeugt werden können. Letzteres kann zur Steuerung des Bauprozesses und somit direkt zur Sicherung der geometrischen Qualität in Echtzeit genutzt werden. Um zu verdeutlichen, dass die Qualitätssicherung während des ingenieurgeodätischen Prozesses bzw. Vorgangs durchgeführt werden kann, wurde dieser in Teilvorgänge I und II unterteilt. Es bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass auch der ingenieurgeodätische Prozess oder Vorgang beliebig detailliert in Teilvorgänge, Vorgangsstufen und Vorgangselemente aufgegliedert werden kann. Die prinzipielle Gültigkeit der Kopplung bleibt dabei unverändert.

6 Ausblick: Kombination von Effizienz und Qualität

Ein ingenieurgeodätischer Prozess ist bei seiner Durchführung hinsichtlich Effizienz und Qualität zu beurteilen. Diese beiden Kriterien sind allerdings nicht streng voneinander zu trennen, vielmehr beeinflussen sie sich gegenseitig: Der Nutzen eines ingenieurgeodätischen Prozesses ist gering, wenn die geforderte Qualität nicht eingehalten wird oder die verfügbare Zeit dafür nicht ausreicht. Offensichtlich geht eine hohe Effizienz zu Lasten der Qualität – und umgekehrt.

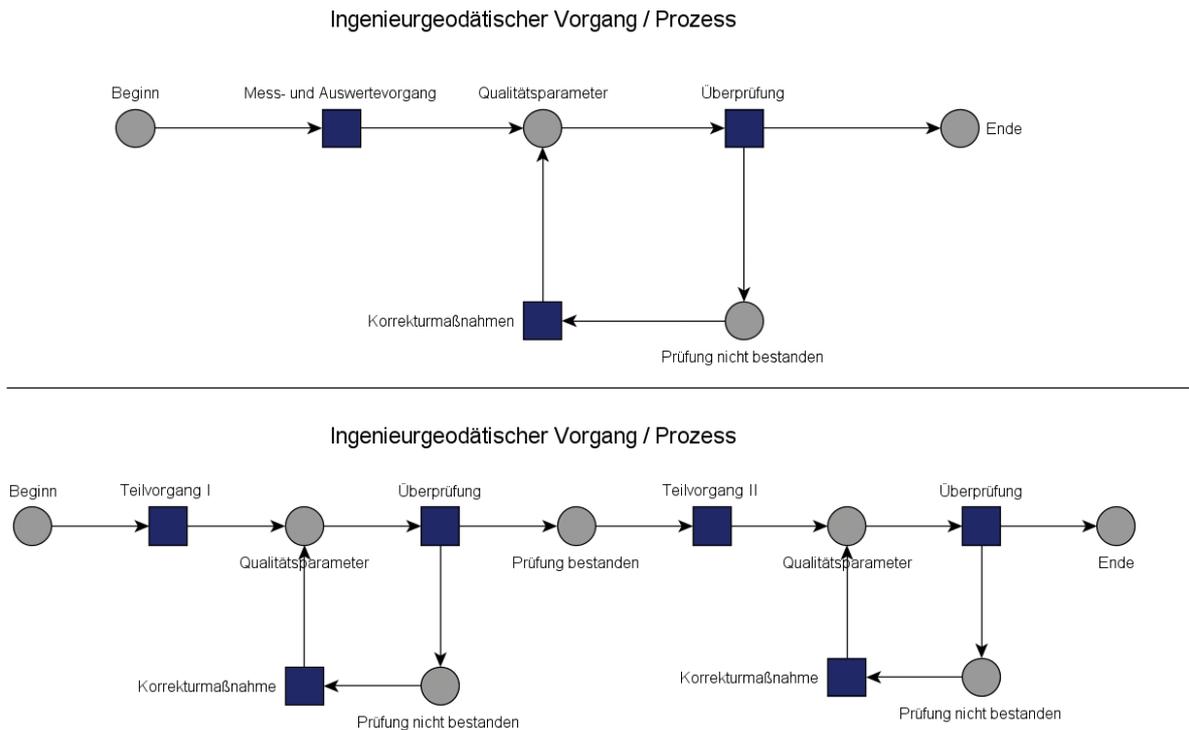


Bild 12. Verknüpfung des Qualitätsmodells mit Petri-Netzen; oben: nach Prozessabschluss, unten: während des Prozesses
 Fig. 12. Linking the quality model with Petri nets; top: after finishing process, bottom: during the process

Folglich kann man sagen, dass sowohl die Erfüllung der Qualitätskriterien als auch die Einhaltung von Zeitvorgaben Mindestvoraussetzungen für ein zu lieferndes Produkt sind. Im Sinne der Optimierungstheorie ist die Qualität somit als Randbedingung hinsichtlich der Effizienzoptimierung aufzufassen. Die Qualitätsparameter können dabei in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die eine Gruppe beinhaltet Qualitätsparameter, die strikt einzuhalten sind. In der anderen Gruppe sind die Parameter zu finden, die als weiche Randbedingungen eingeführt werden können. Die Einhaltung der „Maßtoleranz“ wäre zum Beispiel eine strikte Randbedingung, die auf jeden Fall eingehalten werden muss, ebenso der maximal zulässige „Zeitverzug“. Die „Anzahl der fehlenden Elemente“ kann als weiche Randbedingung eingeführt werden, d.h. die Erfüllung wäre keine Voraussetzung für die Effizienzoptimierung.

Umgekehrt drosselt die Effizienzbetrachtung die Anstrengungen bei der Erfüllung der Qualität sowohl im Hinblick auf eine echte Übererfüllung als auch bei der möglichst exakten Einhaltung der Qualitätsforderungen. So ist z.B. bei Erreichen einer höheren Genauigkeit als gefordert zu prüfen, ob der Aufwand aus Effizienzsicht vertretbar ist.

Um Effizienzoptimierung und Qualitätsmodell mathematisch koppeln zu können, sind die ingenieurgedächlichen Vorgänge, Teilvorgänge usw. hinreichend detailliert unter Nutzung von Petri-Netzen aufzuschlüsseln (vgl. zum Beispiel Bild 12). In der Folge sind Verfahren zur Effizienzoptimierung an konkreten Beispielen in Simulationen zu erforschen. Dies gilt auch für die Qualitätsfortpflanzung in ingenieurgedächlichen Prozessen und die Entwicklung von typischen Qualitätssicherungsmaßnahmen. Zurzeit konzentrieren sich die Partner auf die Effizienz und Qualität ingenieurgedächlicher Prozesse nach Abschluss der jeweiligen Prozesse. Zukünftig soll es, wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, hier einen Schritt weitergehen: die Effizienzoptimierung und die Qualitätssicherung sollen mit ihren Algorithmen,

Vorgehensweisen und Strategien in Echtzeit Ergebnisse liefern. Hierzu sind sie in das Baumanagement zu integrieren und die Tauglichkeit im Baustelleneinsatz zu überprüfen.

Danksagung

Die in diesem Beitrag veröffentlichten Forschungen werden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgedächlicher Prozesse im Bauwesen“ unter den Kennzeichen BE 2159/11-1, BE 3873/1-1, KU 1250/10-1 und SCHW 838/3-1 durchgeführt. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Schwieger, V.; Zhang, L.; Wengert, M. (2010): A Quality Model for Residential Houses Construction Processes. XXIV FIG International Congress, Sydney, Australia, 11.-16.04.2010.
- [2] Günthner, W. A.; Klaubert, C.; Schorr, M. (2008): Forschungsverbund -Virtuelle Baustelle“ (ForBAU) digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung, Bauhaus-Univ. Weimar, Univ.-Verl. In: Tag des Baubetrieb 2008, Heft Nr. 17.
- [3] Yamazaki, Y. (2004): Future Innovative Construction Technologies: Directions and Strategies to Innovate Construction Industry. Proceedings on 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Jeju, Korea, 21.-25.09. 2004.
- [4] Girmscheid, G. (2006): Strategisches Bauunternehmensmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [5] REFA (1978) Methodenlehre des Arbeitsstudiums, 6 Bände: Grundlagen, Datenermittlung, Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung, Anforderungsermittlung, Lohndifferenzierung; Hrsg.: REFA-Verband e.V., Hanser Verlag, München.

- [6] Berner, F. (1983): Verlustquellenforschung im Ingenieurbau, Entwicklung eines Diagnoseinstruments unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit von Zeitaufnahmen. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag.
- [7] Baumgarten, B. (1996): Petri-Netze – Grundlagen und Anwendungen, Heidelberg: Spektrum Verlag.
- [8] Rinke N. (2009): Hybride Prozessmodellierung unter Berücksichtigung geometrischer Nebenbedingungen In: Forum Bauinformatik, S. 287–297.
- [9] Gabler Verlag (Herausgeber) (2010): Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Effizienz, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7640/effizienz-v9.html>.
- [10] Domschke, W. ; Drexl, A. (2005): Einführung in Operations Research. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag.
- [11] Boersch, I. ; Heinsohn, J. ; Socher, R. (2007): Wissensverarbeitung. 2. Auflage. München: ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag.
- [12] Weicker, K. (2007): Evolutionäre Algorithmen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag.
- [13] Rehr, I.; Kutterer, H. (2010): Effizienzoptimierung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen. In: Schriftenreihe des DVW – Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen, Bd. 62, Wißner Verlag, S. 307–321.
- [14] Rehr, I.; Rinke, N.; Kutterer, H.; Berkahn, V. (2010): Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung tachymetrischer Netzmessungen. In: AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (akzeptiert)
- [15] Kelter, U. (2007): Software Qualitätsmodelle, <http://pi.informatik.uni-siegen.de/lehre/2007s/LM/>, Siegen.
- [16] Boehm B.W., Brown J.R., Kaspar H., Lipow M., Macload G.J., Merrit M.J. (1978). *Characteristics of Software Quality*. North-Holland.
- [17] Wiltshko T. (2004). Sichere Informationen durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Fortschritt-Bericht VDI. s.l. : VDI-Verlag Düsseldorf, 2004. Bd. Reihe 12 Nr. 570, Dissertation.
- [18] DIN 18202 (2005) : Toleranzen im Hochbau – Bauwerke, Beuth Verlag, Berlin.
- [19] DIN 18710–1 (1998): Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin.
- [20] Möhlenbrink, W. ; Kuhlmann, H. ; Dünisch, M. (2002): Vermessung „Feste Fahrbahn“, Verfahren für die Vermessung der Bauart „Feste Fahrbahn“. In: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender. Tetzlaff-Verlag, Hamburg.
- [21] Schweitzer, J.; Schwieger, V. (2010): Modeling of Quality for Engineering Geodesy Processes in Building Constructions. *Journal of Applied Geodesy*, Walter de Gruyter (in Vorbereitung).