

5. Fachtagung Baumaschinentechnik 2012

Energie, Mechatronik, Simulation

Potentiale der Baumaschinensensorik für die Bauproduktionssteuerung im Erdbau

Tobias Bregenhorn
Sascha Gentes



Dipl.-Ing. Tobias Bregenhorn
Institut für Technologie und Management im
Baubetrieb (TMB) des
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Geb. 50.31
Am Fasanengarten
D-76131 Karlsruhe

Potentiale der Baumaschinensensorik für die Bauproduktionssteuerung im Erdbau

Eine grundsätzliche Herausforderung für Bauprojekte ist die Einhaltung der vereinbarten Kosten-, Termin- und Qualitätsziele. Damit diese Einhaltung möglich ist, müssen in dem dynamischen Produktionssystem „Baustelle“ geeignete Steuerungsmaßnahmen frühzeitig identifiziert und zeitnah umgesetzt werden. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass alle erforderlichen Prozessinformationen bezüglich Bauzustand und -ablauf sowie der – den geplanten und ungeplanten Änderungen unterworfenen – Systemzustände mit möglichst geringem Aufwand erfasst, zeitnah aufbereitet und entsprechend des Informationsbedarfs den einzelnen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Die hier vorgestellte Arbeit zeigt bisher nicht genutzte Potentiale der Baumaschinensensorik für die Bauproduktionssteuerung auf.

1 Einleitung

Die Entwicklung der Baumaschinensensorik ist in den letzten Jahren enorm vorangeschritten. Im Bereich der Erdbaumaschinen wurde es insbesondere möglich „millimetergenaue“ Daten der Arbeitswerkzeuge zu erfassen. Ein großes Problem stellt jedoch die Nutzung dieser Daten zur aktiven Produktionssteuerung dar. Während in der stationären Industrie bereits seit längerem eine Kombination aus Material Resource Planning und Manufacturing Execution Systemen zur Produktionssteuerung verwendet wird, ist eine vergleichbare Datennutzung im Bauwesen bisher nur in sehr geringem Umfang erfolgt. Ursache hierfür sind die deutlich komplexeren semantischen und syntaktischen Zusammenhänge des Bauwesens.

Im Bauwesen sind neue IT-Lösungen notwendig, um eine transparentere, ressourceneffizientere und flexiblere Produktion und damit eine Steigerung von Qualität und Produktivität zu erreichen. Höchste Maschineneffizienz und lückenlose Rückverfolgbarkeit sind ebenso erforderlich (vgl. [1], [2] und [3]) wie eine Minimierung der Warte- und Ausfallzeiten. Hierfür benötigen die zahlreichen am Bau beteiligten Akteure eine gezielte Unterstützung durch Handlungsvorschläge und Informationsaufbereitungen. Dies kann durch eine Verbesserung der Informationslogistik erzielt werden, welche somit im Bauwesen ein enormes Verbesserungspotential darstellt.

Besonders im Erdbau müssen Prozessinformationen in möglichst kleinen Zeitabständen zur Verfügung stehen, da sich die vorherrschenden – und teilweise im Voraus nicht genau bekannten oder gänzlich unbekanntes – Randbedingungen (z.B. Bodeneigenschaften und Witterungseinflüsse) im dynamischen Gesamtsystem kurzzyklisch ändern können. Bei solchen Änderungen der Randbedingungen sind in der Regel Anpassungen innerhalb des Produktionsnetzwerks und ggf. sogar der eingesetzten Produktionsverfahren notwendig, um eine an die Situation angepasste – möglichst optimale – Produktion zu erreichen.

Prozessinformationen werden jedoch auf der Baustelle nur dann erfasst, wenn ein geeignetes Informationssystem zur Verfügung steht. Im Gegensatz zur stationären Industrie existiert ein solches Informationssystem im Erdbau bisher nicht in vollem Umfang.

Bestehende Informationssysteme im Erdbau fokussieren einzelne Teilbereiche, wie z.B.:

- Flottenmanagementsystem:
Erfasst im Wesentlichen die Aufenthaltsorte der Baumaschinen, deren Zustände („fährt“, „Motor an“, „steht“, „Tanken notwendig“ etc.) sowie wartungs- und reparaturrelevante Informationen (inklusive einer entsprechenden Auswertung der Datenhistorie).
- Baumaschinensensorik zur Positionssteuerung (GPS, GPS+Laser, Tachimeter etc.):
Verwendet Geometriedaten zur Positionsbestimmung von Arbeitswerkzeug und Maschine. Ist teilweise in der Lage Verknüpfungen mit CAD-Daten herzustellen (d.h. Referenzverhältnisse).
- Planungssoftware (Geometrieplanung, Terminplanung und Kostenplanung):
Maximal wird der Sollzustand in fünf Dimensionen abgebildet (3D-Geometrie inklusive Termin- und Kostenplanung).

Den momentan größten Mangel von IT-Systemen im Bauwesen stellt der bisher komplizierte und bezogen auf die Zyklusdauer zu lange Vergleich von Soll- und Ist-Zuständen dar (d.h. die Feststellung des Unterschieds zwischen Planung und tatsächlicher Ausführung). Diese Feststellung ist eine Grundvoraussetzung für eine gezielte Bauproduktionssteuerung.

Im Folgenden wird das Verständnis des Bauproduktionsprozesses generisch dargestellt, um darauf basierend die Potentiale für eine vernetzte Nutzung von Baumaschinensensordaten in der Bauproduktionssteuerung für den Spezialfall Erdbau abzuleiten.

2 Bauproduktion als Wertschöpfungsprozess

Aus systemtechnischer Sicht besteht eine Baustelle aus drei Hauptkomponenten; dem Input, dem Produktionsprozess bzw. den einzelnen Arbeitssystemen und dem Output. Auf den Produktionsprozess wirken unterschiedlichste Einflussgrößen, die den Output beeinflussen.

Tempelmeier definiert den Begriff der (industriellen) Produktion wie folgt:

„Unter (industrieller) Produktion versteht man die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nichtmateriellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen“ [4]

Ein Produktionssystem setzt sich aus einzelnen Abschnitten zusammen, die jeweils einen bestimmten Teil der Produktion eines Erzeugnisses abdecken. Diese Abschnitte sind nach Möglichkeit so zu organisieren, dass ein gleichmäßiger und verschwundungsarmer Arbeitsfluss entsteht (vgl. [5], [6], [7], und [8]). Die kleinste selbstständig arbeitsfähige Einheit, die jeweils einen einzelnen Abschnitt eines Produktionsprozesses ausführt, wird nach Tempelmeier Arbeitssystem bezeichnet (vgl. [4]).

Damit ein Arbeitssystem¹ tätig werden kann, benötigt es Vorprodukte (Input). Innerhalb der Arbeitssysteme werden die Produktionsfaktoren so miteinander verknüpft, dass am

¹ Eine grundsätzlichere Darstellung ist in [9] zu finden.

Ende des Arbeitssystems ein Mehrwert, bezogen auf das Arbeitsobjekt und aus Sicht des Kunden, entsteht (Output). Die bearbeiteten Arbeitsobjekte sind, abgesehen vom Endprodukt, das an den Endkunden übergeht, selbst wiederum Produktionsfaktoren für noch folgende Arbeitssysteme. Während des Wertschöpfungsprozesses wirken äußere (exogene) und innere (endogene) Einflüsse auf den Produktionsprozess.

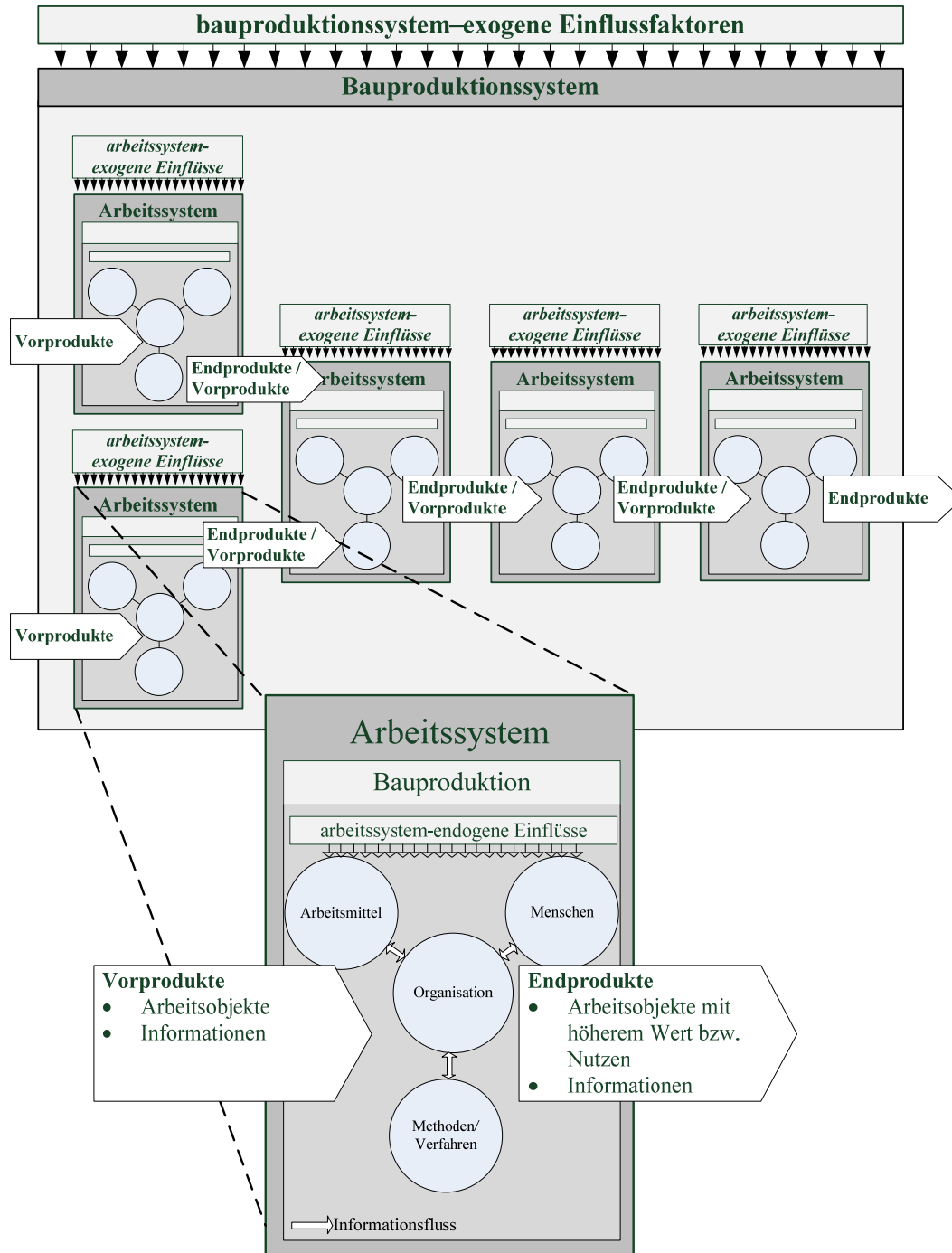


Bild 1: Theoretisches Modell eines Bauproduktionssystems [eigene Darstellung]

Überträgt man die aus der stationären Industrie stammende Definition von Günther und Tempelmeier auf das Bauwesen, so kann Bauproduktion² wie folgt definiert werden:

- **Das Ziel der Bauproduktion ist es, durch Wahl und zielorientierten Einsatz geeigneter Produktionsfaktoren unter den gegebenen Bedingungen, die durch Einflüsse aus dem Umfeld der Produktion und produktionsinhärente Einflüsse entstehen, den zuvor vom Kunden definierten Wert bzw. Nutzen möglichst ökonomisch zu generieren.**

In Bild 1 ist das theoretische Modell eines Bauproduktionssystems abgebildet. Im Erdbau sind die einzelnen Arbeitssysteme z.B. räumlich und zeitlich begrenzte Aufgaben der Bereiche: Lösen, Laden, Fördern, Einbauen und Verdichten. Die Zwischenprodukte (in der Grafik "Endprodukte/ Vorprodukte") sind dementsprechend z.B. Erdmaterial, das eine höhere Fertigungsstufe hat (d.h. im Vergleich zum Zustand vor der Bearbeitung durch das Arbeitssystem ist das bearbeitete Objekt – hier z.B. Erdmaterial – einen Schritt näher in Richtung Endprodukt gerückt, z.B. durch eine Bodenverbesserung mit Kalk).

2.1 Die Bauproduktionsfaktoren

Unter Produktionsfaktoren werden diejenigen – immateriellen und materiellen – Gegenstände verstanden, die ein Produktionsprozess benötigt, um Arbeitsleistung zu erbringen. Produktionsfaktoren werden je nach Quelle unterschiedlich unterteilt³, wobei das Gesamtverständnis der Begrifflichkeit jedoch weitestgehend übereinstimmt. Eine auf das Bauwesen abgestimmte Definition ist in [16], [17] und [22] zu finden. Bild 2 stellt die für diese Arbeit verwendete Einteilung der Bauproduktionsfaktoren dar.

Bauproduktionsfaktoren						
materielle Bauproduktionsfaktoren				immaterielle Bauproduktionsfaktoren		
Arbeitsmittel	Arbeitsobjekte	Infrastruktur/ Arbeitsraum	Mensch	Organisation	Informationen	Methoden/ Verfahren

Bild 2: Einteilung der Bauproduktionsfaktoren⁴ [eigene Darstellung]

Aufgrund der häufig abweichenden Auftragsstruktur der einzelnen Bauaufträge, wird im Gegensatz zur stationären Industrie in den meisten Fällen keine optimale Produktionsfaktorkonstellation eingesetzt, sondern eine „relativ optimale“ Lösung realisiert. Dies ergibt sich dadurch, dass oft schon Produktionsfaktoren vorhanden sind, die aufgrund relativ hoher Investitionskosten (zu Lasten höherer projektspezifischer Produktionskosten) eingesetzt werden. Zur Entscheidung, ob es sinnvoll ist neue Investitionen zu tätigen, muss eine auf einer detaillierten Kalkulation basierenden Bewertung⁵ durchgeführt werden.⁶

² Girmscheid stellt eine ausführliche Definition der Bauproduktionstheorie in [10], [11] und [12] vor. Eine weitere Darstellung ist in [13] zu finden.

³ vgl. [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21] und [22]

⁴ Diese Darstellung orientiert sich an [4] und verbindet sie mit der klassischen Definition nach [14].

⁵ Neben der reinen Kostenbetrachtung ist es notwendig weitere Faktoren wie z.B. Flexibilität zu bewerten.

Die Verfügbarkeit von Bauproduktionsfaktoren ist zeitabhängig, z.B. können Arbeitskräfte aus Krankheitsgründen ausfallen und stehen somit nicht mehr zur Verfügung.

Des Weiteren schwankt die während des Betriebs erreichte Leistung der Bauproduktionsfaktoren. Die Ursachen dieser Schwankung sind die exogenen und endogenen Einflüsse des Bauproduktionssystems, die im Folgenden am Beispiel der Erdbaus erläutert werden.

2.2 Die Einflüsse auf das Bauproduktionssystem Erdbau

Grundsätzlich kann unterschieden werden, ob Einflüsse von außen auf ein Produktionssystem wirken oder ob es sich um produktionssystem-inhärente Einflüsse handelt. Die von außen auf das Produktionssystem wirkenden Einflüsse werden „produktionssystem-exogene Einflüsse“ genannt. Einflüsse die aus dem Produktionssystem selbst resultieren, werden „produktionssystem-endogene Einflüsse“ genannt. In Bild 3 ist die Einteilung der genannten Einflüsse abgebildet.

Einflüsse auf das Bauproduktionssystem						
bauproduktionssystem-exogene Einflüsse					bauproduktionssystem-endogene Einflüsse	
Ökonomie	natürliche Umwelt	soziale/politische Faktoren	Entwicklung von Methoden/Verfahren	Technologische Entwicklungen	arbeitssystem-exogene Einflüsse	arbeitssystem-endogene Einflüsse

Bild 3: Einflüsse auf das Bauproduktionssystem [eigene Darstellung]

Die Umwelt, in der Unternehmen (und damit auch das zugehörige Produktionssystem) agieren verändert sich ständig. Produktionssystem-exogene Einflüsse sind im Wesentlichen Einflüsse, die aus der Wirtschaft (Ökonomie), der natürlichen Umwelt, sozialen und politischen Faktoren⁷ sowie der Weiterentwicklung von Methoden, Verfahren und Technologien resultieren.⁸

Da der Hauptauftraggeber von Infrastrukturbaumaßnahmen die öffentliche Hand ist⁹, sind hier beispielsweise konjunkturelle Investitionsmaßnahmen des Staates von sehr großer Bedeutung¹⁰. Eine Besonderheit im Erdbau ist die starke Abhängigkeit von den aus der natürlichen Umwelt resultierenden Einflüssen, insbesondere ist hier die Abhängigkeit gegenüber der Witterung, Geographie und Geologie zu erwähnen.

Die Unternehmen benötigen qualifizierte Mitarbeiter, die sie vom Arbeitsmarkt akquirieren. Werden neue Methoden, Verfahren oder Technologien auf dem dazugehörigen Markt verfügbar, so muss das Unternehmen hierauf reagieren, um langfristig konkurrenzfähig bleiben zu können.

⁶ vgl. [23]

⁷ z.B. demographische Entwicklungen und Gesetzesregelungen.

⁸ vgl. [19].

⁹ vgl. [24]. Dem gegenüber ist ein Trend zu privaten Betreibermodellen festzustellen (sog. PPP-Projekte).

¹⁰ Die Investitionsmöglichkeiten des Staates hängen wiederum von den Steuereinnahmen und damit von der ökonomischen Situation des Landes ab.

Die einzelnen Unternehmen haben allerdings nur sehr begrenzten Einfluss auf die produktionssystem-exogenen Einflüsse¹¹, weshalb der Fokus dieser Arbeit auf den produktionssystem-endogenen Einflüssen liegt. Da der Erdbau direkt in seinem natürlichen Umfeld stattfindet und mit diesem interagiert, werden die hieraus resultierenden Einflüsse weiterhin explizit berücksichtigt.

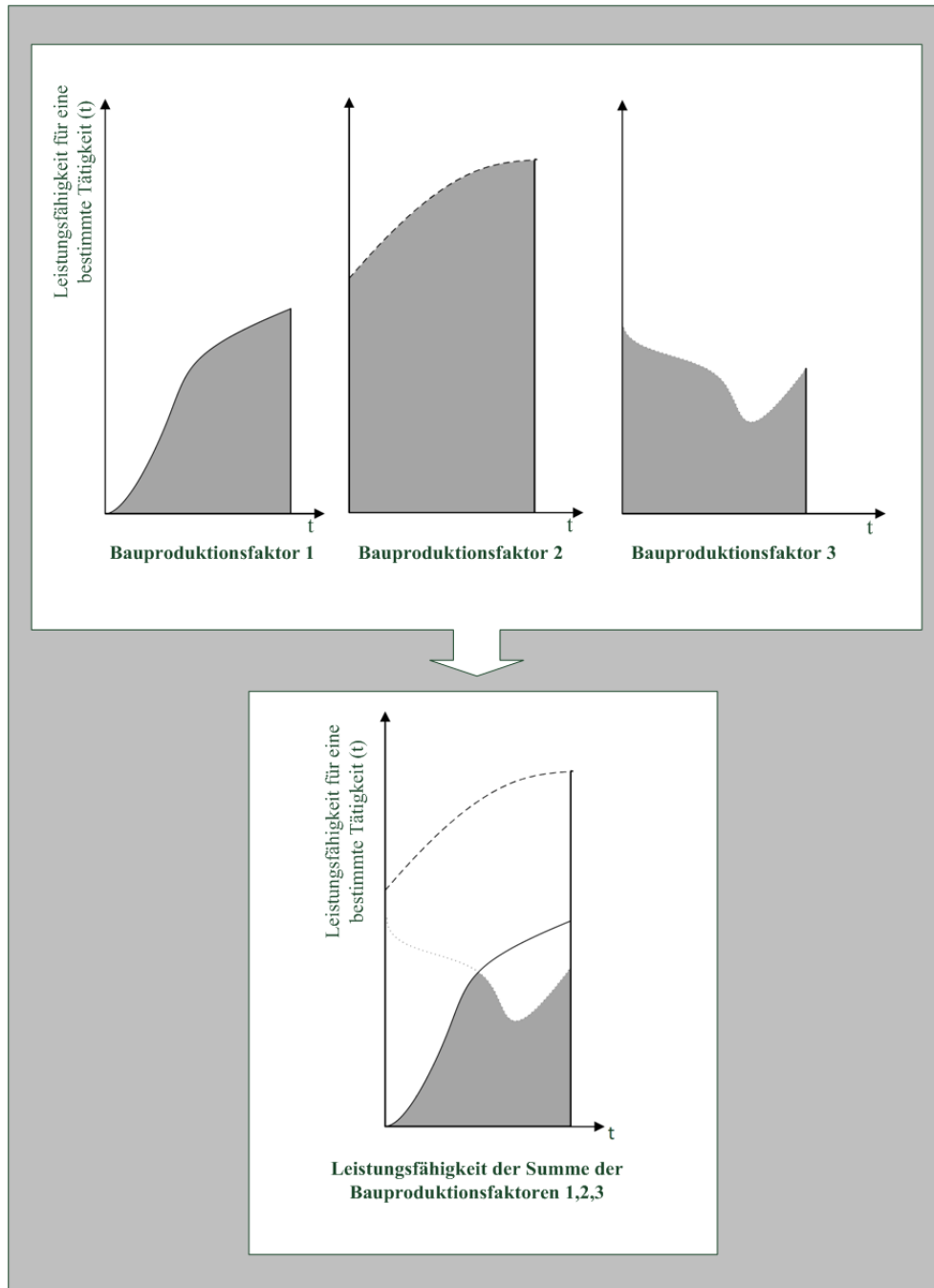


Bild 4: Kontinuierliche Darstellung der Leistungsfähigkeit der Bauproduktionsfaktoren¹² [eigene Darstellung]

¹¹ z.B. Bildung von Verbänden, die gezielt Interessen gegenüber der Politik vertreten.

¹² Gilt für direkte Abhängigkeit zwischen den Bauproduktionsfaktoren.

Die produktionssystem-endogenen Einflüsse resultieren aus den Produktionsfaktoren und ihrem Zusammenspiel. Die produktionssystem-endogenen Einflüsse lassen sich weiter in „arbeitssystem-exogene“ und „arbeitssystem-endogene“ Einflüsse unterteilen. Die arbeitssystem-exogenen Einflüsse wirken von außen auf das Arbeitssystem (z.B. Lieferantenprozess wirkt exogen auf Kundeprozess). Die „arbeitssystem-endogenen Einflüsse“ haben ihren Ursprung im jeweiligen Arbeitssystem und entstehen durch die Kombination der Produktionsfaktoren während der Produktion. Die Einflüsse auf das Bauproduktionssystem Erdbau werden in unterschiedlichen Literaturquellen thematisiert¹³.

Die Bauproduktion wird unter der Berücksichtigung bestimmter Einflüsse geplant. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System sich wie in der Planung angenommen verhält, sehr gering¹⁴. Insbesondere der Erdbau ist in seiner betrieblichen Ausprägung ausgesprochen „unstabil“¹⁵. Treten andere Einflüsse, als in der Planung angenommen auf, oder ist deren Auswirkung nicht identisch mit den in der Planung getroffenen Annahmen, entstehen Abweichungen zur ursprünglichen Planung.

Einflüsse führen aufgrund der Unkenntnis über die Ausprägung der Auswirkungen letztlich zu Unsicherheiten über Systemzustände. Die Unsicherheiten ihrerseits führen dazu, dass im Bauwesen Puffer eingeplant werden¹⁶.

Zielabweichungen bedeuten in der baubetrieblichen Praxis Abweichungen von geplanten Kosten, Terminen und Qualitäten. Die Ursachen von Zielabweichungen liegen häufig in der (bedingt durch die benannten Einflüsse (vgl. Bild 3)) schwankenden Leistungsfähigkeit der in einem Netzwerk agierenden Bauproduktionsfaktoren¹⁷. Hierbei gilt, dass eine Gruppe von Bauproduktionsfaktoren nur so stark sein kann wie das schwächste Glied¹⁸. In Bild 4 ist dieser Zusammenhang visualisiert, wobei der dunkelgraue Bereich unter den Kurven die zeitabhängige Leistungsfähigkeit der Bauproduktionsfaktoren darstellt.

Sollte aufgrund von Zielabweichungen eine Änderung des Einsatzes der Bauproduktionsfaktoren notwendig bzw. ökonomisch sinnvoll werden, muss schnellstmöglich gehandelt werden, um einerseits die Auswirkungen der negativen Zielabweichungen möglichst gering zu halten und andererseits das Potential von positiven Zielabweichungen möglichst optimal ausschöpfen zu können.

3 Prozessverstetigung als Verbesserungszielgröße

Im vorherigen Kapitel wurde das dynamische System Bauproduktion theoretisch beschrieben. Darauf aufbauend werden im Folgenden weitere Zusammenhänge hergeleitet. Die Bauproduktionsfaktoren, deren Organisation sowie die auf diese wirkenden Einflüsse sind Quellen für die Variabilität der Leistung der Prozesse. Schwankende Leistungen be-

¹³ vgl. [22], [25], [26], [23], [27], [28], [29], [30], und [31].

¹⁴ vgl. [22], [23], [25], und [27]

¹⁵ vgl. [23].

¹⁶ Zu den Zusammenhängen zwischen Unsicherheiten und Puffern siehe z.B. [13].

¹⁷ Dies gilt überwiegend bei Termin- und Kostenabweichungen, gilt aber auch für Qualitätsabweichungen, da Qualität wiederum von Terminen und Kosten (Magisches Dreieck des Projektmanagements) abhängt.

¹⁸ vgl. [32]

dingen eine höhere Dimensionierung der Leistungsfähigkeit der Arbeitssysteme. Eine Verstetigung der Leistung führt zu einer besseren Auslastung und einem geringerem – bezogen auf die Dimensionierung – Leistungsbedarf des Gesamtsystems (wie nachfolgende gezeigt wird). Damit Prozesse verstetigt werden können, sind jedoch die Quellen der Variabilität zu identifizieren und zu eliminieren bzw. deren Auswirkung zu verringern. Insbesondere bei der Identifizierung kann eine geeignete Verknüpfung von Baumaschinensensordaten beitragen.

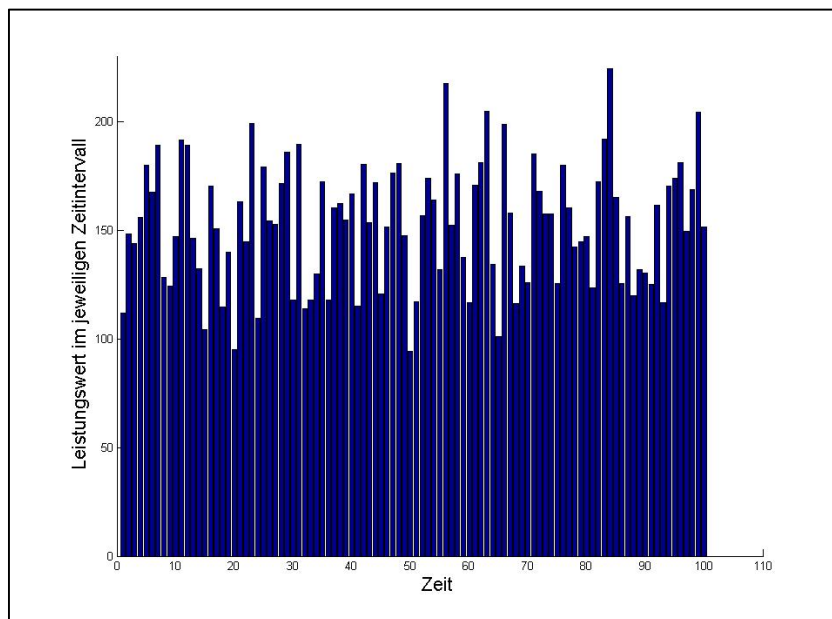


Bild 5: Unter den jeweiligen Randbedingungen erreichte Leistung eines Bauproduktionsfaktors, Prinzipskizze (vgl. [27])

Die Leistungsschwankungen eines Bauproduktionsfaktors (vgl. Bild 5) lassen sich in einem Histogramm darstellen (vgl. Bild 6).

Das Ausmaß der Streuung lässt sich anhand des Variationskoeffizienten $v(t)$ bewerten:

$$v(t) = \frac{SL(t)}{E(t)} \quad (1)$$

$v(t)$ = Variationskoeffizient

$SL(t)$ = Standardabweichung

$E(t)$ = Erwartungswert

Je höher der Variationskoeffizient $v(t)$ desto größer sind die Leistungsschwankungen in Relation zum Erwartungswert $E(t)$. Die zeitliche Abhängigkeit t gilt, da die Leistungswerte je nach gewähltem Betrachtungshorizont voneinander abweichen können.

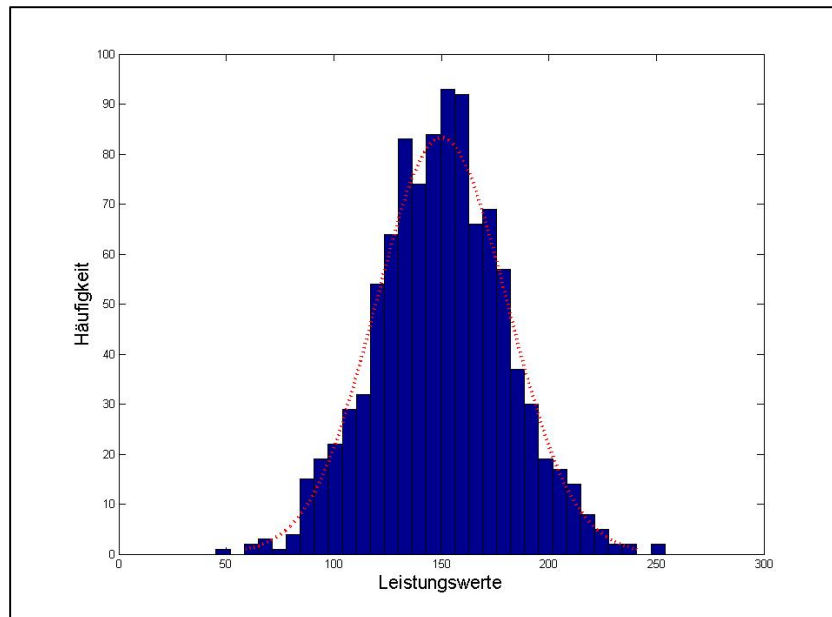


Bild 6: Histogramm der Leistungswerte aus Bild 5, Prinzipskizze [eigene Darstellung]

Bei der Planung wird einem Bauprozess ein bestimmter Leistungsbedarf zugeordnet (d.h. er wird bezüglich seiner Leistungsfähigkeit dimensioniert). Auf Grundlage der geplanten Leistungsfähigkeit werden passende Bauproduktionsfaktoren ausgewählt (im Erdbau insbesondere Baumaschinen). Aufgrund der aus den jeweiligen Randbedingungen resultierenden Leistungsschwankungen stellt sich für die Dimensionierung der in einem Produktionsprozess beteiligten Bauproduktionsfaktoren die Frage, für welche Leistungsfähigkeit diese ausgelegt werden sollen. Da eine Gruppe von Bauproduktionsfaktoren nur so stark wie das schwächste Glied ist (vgl. Bild 4), muss (unter der Annahme, dass nur mit einer bestimmten geringen Wahrscheinlichkeit ein Systemengpass entstehen darf) eine – bezogen auf den Erwartungswert –,„Überdimensionierung“ erfolgen. Unter der Annahme, dass die erreichten Leistungen normalverteilt sind (vgl. [25]), kann eine Dimensionierung wie folgt durchgeführt werden:

$$GL = EL + SL \cdot u_y \quad (2)$$

GL = geplante Leistungsfähigkeit

EL = Erwartungswert der geplanten Leistungsfähigkeit

SL = Standardabweichung der geplanten Leistungsfähigkeit

u_y = Quantil der $N(0,1)$ -Verteilung.

Die geplante Leistungsfähigkeit ist somit mit der Wahrscheinlichkeit von

$$y = 1 - \alpha \quad (3)$$

y = Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung des Bauprozesses ausreichend ist (im folgenden Servicegrad)

α = Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung des Bauprozesses nicht ausreichend ist

ausreichend groß um die benötigte Leistungsfähigkeit zu decken.

Die benötigte Leistungsfähigkeit hängt wiederum von der Verknüpfung der betrachteten Gruppe von Bauproduktionsfaktoren ab (d.h. in welcher Abhängigkeit stehen die Bauproduktionsfaktoren zueinander?).

Es ist weiterhin offensichtlich, dass die geplante Leistungsfähigkeit eines Bauproduktionsfaktors von den auf ihn wirkenden Einflüssen abhängig ist, so dass gilt:

$$GL = GL(E) \quad (4)$$

Hieraus folgt für die durchschnittliche Auslastung:

$$\rho = \frac{EL}{GL} \quad (5)$$

ρ = durchschnittliche Auslastung eines Bauproduktionsfaktors

Der Zusammenhang zwischen Auslastung und Variationskoeffizient lässt sich für unterschiedliche Servicegrade wie folgt darstellen:

$$\rho = \frac{EL}{EL + v \cdot EL \cdot u_y} = \frac{1}{1 + v \cdot u_y} \quad (6)$$

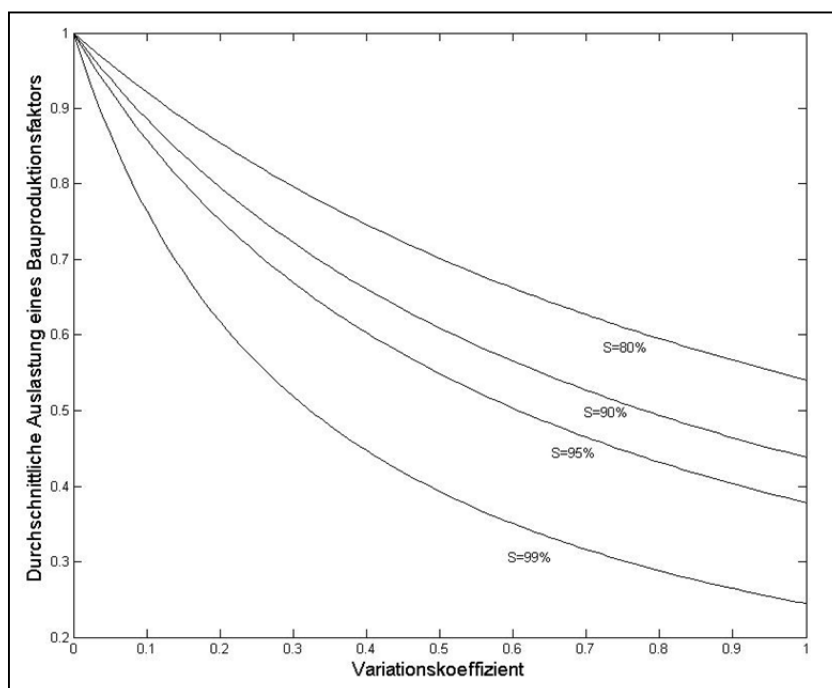


Bild 7: Erreichbare Auslastung eines Bauproduktionsfaktors für bestimmte Servicegrade S, in Abhängigkeit von dessen Variationskoeffizienten [eigene Darstellung]

Für ausgewählte Servicegrade ist dieser Zusammenhang in Bild 7 dargestellt.

Aus Bild 7 wird ersichtlich, welches Potential die Verstetigung der Prozesse besitzt. Die Verringerung des Variationskoeffizienten für die Auslegung der geplanten Leistungsfähigkeit eines Bauproduktionsfaktors ist gleichzusetzen mit einer Erhöhung der Auslastung oder einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit, dass die Dimensionierung des Bauproduktionsfaktors nicht ausreichend ist und somit ein Engpass entsteht.

Aus baubetrieblicher Sicht ist eine Verringerung der geplanten Leistungsfähigkeit allerdings nur sinnvoll, wenn die Variationskoeffizienten nachhaltig verringert werden können. Falls die geplante Leistungsfähigkeit auf der Baustelle verringert wird und die zugehörigen Variationskoeffizienten steigen, entsteht ein Engpass.

4 Potentiale der Baumaschinensensorik für die Bauproduktionssteuerung im Erdbau

Aus den in Kapitel 3 aufgeführten Gründen, ist es wichtig, dass die Schwankungen der erreichten Leistungen von Bauprozessen durch geeignete Sensoren erfasst werden und somit für eine gezielte Bauproduktionssteuerung zur Verfügung stehen.

Können durch geeignete Sensoren und/oder einer Verknüpfung dieser Sensoren die Leistungsschwankungen festgestellt werden, so können folgende grundlegende Maßnahmen zur Verbesserung der Bauproduktionsprozesse vorgenommen werden:

1. Die Ursachen von Prozessvarianzen sind zu identifizieren und weitestgehend zu eliminieren.
2. In den Fällen, in denen die Ursachen nicht eliminiert werden können, sind Puffer in Form von Leistungsfähigkeit und Zeit (bzw. fertigen Zwischenprodukten) einzuplanen, um die Abhängigkeit der Prozesse untereinander zu verringern und somit die Ausbreitung von Leistungsschwankungen zu verringern.
3. In den Fällen, in denen trotz der vorausschauenden Maßnahmen 1. und 2. Engpässe in Bauproduktionsprozessen auftreten, ist möglichst kurzfristig auf die gegebenen Umstände so zu reagieren, dass die Bauproduktionsfaktoren eine höhere Auslastung erreichen (z.B. durch eine entsprechenden Ressourcenreallokation).

Die Wirksamkeit der ersten Maßnahme lässt sich leicht anhand von Bild 7 nachweisen, wonach eine Verringerung des Variationskoeffizienten einer Steigerung der Auslastung des hierdurch beeinflussten Bauproduktionsfaktors gleicht (gilt für gleichbleibende Servicegrade).

Die Wirksamkeit der zweiten Maßnahme kann leicht mit Hilfe der Warteschlangentheorie und z.B. dem sog. G|G|1- Modell nachgewiesen werden, wonach die Auslastung eines Systems bei stochastisch verteilten Ankunfts- und Bedienzeiten direkt von den geplanten Pufferbeständen abhängig ist (vgl. [33]). Entsprechendes gilt umgekehrt; eine niedrige Auslastung benötigt nur einen geringen Pufferbestand. Puffer können des Weiteren, sofern sie ausreichend hierfür dimensioniert wurden, Phasen mit Leistungsschwankungen glätten, was leicht dadurch nachgewiesen werden kann, dass die Summe beliebiger Leistungswerte geteilt durch die Anzahl der Leistungswerte für eine ausreichend hohe Anzahl an Stichproben gegen den Erwartungswert konvergiert (d.h. bei ausreichend großen Puffern kann von dem Erwartungswert der erreichten Leistung ausgegangen werden).

Da Prozessvarianzen im Bauwesen nicht komplett eliminierbar sind (z.B. bedingt durch Witterungseinflüsse) und Puffer nicht immer ausreichend dimensioniert werden können (da die Lagerkosten mit Anzahl der Zwischenprodukte steigen oder der Lagerplatz beschränkt ist), entstehen meist trotz der oben genannten Maßnahmen eins und zwei kurzfristige Systemengpässe. Die Anzahl der Systemengpässe hängt von der Dynamik und Komplexität (Vernetzungsgrad, Abhängigkeiten der Systemkomponenten etc.) des Bauproduktionssystems ab. In den Fällen, in denen ein Engpass entsteht, gilt es auf Zwischentätigkeiten auszuweichen.

Da sich die Varianz der Prozesszeiten innerhalb einer Produktionskette „fortpflanzt“, werden durch die Verringerung der Varianz eines Produktionsprozesses ebenfalls die Varianzen des Outputs der Produktionskette anteilig verringert (vgl. [34]). Dies gilt allerdings nur

sofern die Varianzen nicht durch ausreichend Pufferung zwischen den einzelnen Prozessen abgefangen werden.

Sensorik kann in Kombination mit passenden Managementmethoden in allen drei Fällen der Bauleitung helfen, Potentiale zur Prozessverstetigung zu identifizieren und passende Handlungsmaßnahmen abzuleiten.

Durch den gezielten Einsatz von Sensorik können kurzfristig insbesondere folgende Zeiten verringert werden:

- Zeitdauer zwischen Auftreten eines nicht optimalen Systemzustands und Beginn der Ursachensuche durch das zuständige Personal
- Zeitdauer, die zur Feststellung der Ursache des nicht optimalen Systemzustands benötigt wird
- Zeitdauer für die Vorbereitung und Organisation der Verbesserungsmaßnahme (aufgrund der gesteigerten Transparenz der Systemzusammenhänge)

Insbesondere der erste Punkt bietet ein großes Verbesserungspotential, da aufgrund der bisherigen Intransparenz in Erdbauprozessen dieser Zeitraum erheblich sein kann.

Es ist deutlich zu machen, dass die Eskalation der Verbesserungsmaßnahmen in den Fällen, in denen es sich nicht um ein Standardvorgehen handelt, nicht automatisiert erfolgen sollte, da häufig ein entsprechendes Change-Management erforderlich ist, welches nur durch direkte Personenbeteiligung erfolgreich umgesetzt werden kann. Dies ist gerade bei langfristigen Verbesserungsmaßnahmen zu beachten.

Dem gegenüber stehen die langfristigen Potentiale von IT-Systemen (die auf einer vernetzten Sensorik basieren), die allerdings nur in Kombination mit geeigneten Managementmethoden realisierbar sind (vgl. [5]). Zu diesen langfristigen Potentialen gehören insbesondere:

- Lernprozesse aus Fehlern werden unterstützt durch eine transparente Datengrundlage
- Schnellere Lernzyklen auf Basis einer geeigneten Dokumentation
- Auswertungen von Fehlerquellen
- Datengrundlagen für strategische Entscheidungen

Zur digitalen Interpretation der Systemzustände ist eine auf der Kenntnis des entsprechenden Syntax basierende Ausdifferenzierungsstrategie geeignet, die mit Hilfe von Ausschlussbeziehungen Systemzustände identifiziert. Diese können als Grundlage für Entscheidungsunterstützungsalgorithmen herangezogen werden.

Als einfaches Beispiel sei hier der Beladevorgang eines LKW erwähnt. Ein LKW wird beladen, wenn eine Baggerschaufel (z.B. getrackt mit Hilfe einer Kombination aus einer entsprechenden Geofence-Funktion und dem per GPS/GPS+Laser getrackten Baggerlöffel) in regelmäßigen Zeitintervallen über dem LKW erscheint. Hieraus können wiederum die schwankenden Beladezeiten bestimmt werden und damit indirekt die schwankenden Bagger- bzw. Transportleistungen.

Ein weiteres anschauliches Beispiel bieten die Transportzeiten der LKWs. Bei den Transportzeiten muss zunächst zwischen Fahrzeit, Beladezeit, Abladezeit und Wartezeit (am Entlade-, Beladeort und an Zwischenpunkten) unterschieden werden. Die Fahrzeit kann über die Bedingungen festgestellt werden, dass der Ort (getrackt durch z.B. GPS) sich

über einen bestimmten Zeitintervall verändern muss, findet keine Veränderung des Ortes statt, so steht der LKW für diesen Zeitintervall (d.h. er „wartet“ auf ein bestimmtes Ereignis). Wichtig ist im Fall „Warten“ wiederum, an welcher Stelle der LKW ist (Beladungsstelle, Entladungsstelle oder Fahrstrecke). Der Fall „LKW wartet an der Beladestelle“ kann über die oben erwähnte Beziehung oder eine (durch z.B. Geofencing getrackte) Entfernungsbeziehung zwischen Bagger oder LKW identifiziert werden. Der Fall „LKW wartet an der Entladestelle“ kann über eine entsprechende Entfernungsbeziehung zwischen LKW und Entladestelle festgestellt werden (da die Entladestellen wechseln, kann dies nur rückwirkend festgestellt werden, d.h. nach der Feststellung des Entladeortes des LKW). Die Feststellung ob der LKW auf der Fahrstrecke steht kann über die Kenntnis der Start-Ziel-Beziehungen erfolgen (ebenfalls rückwirkend).

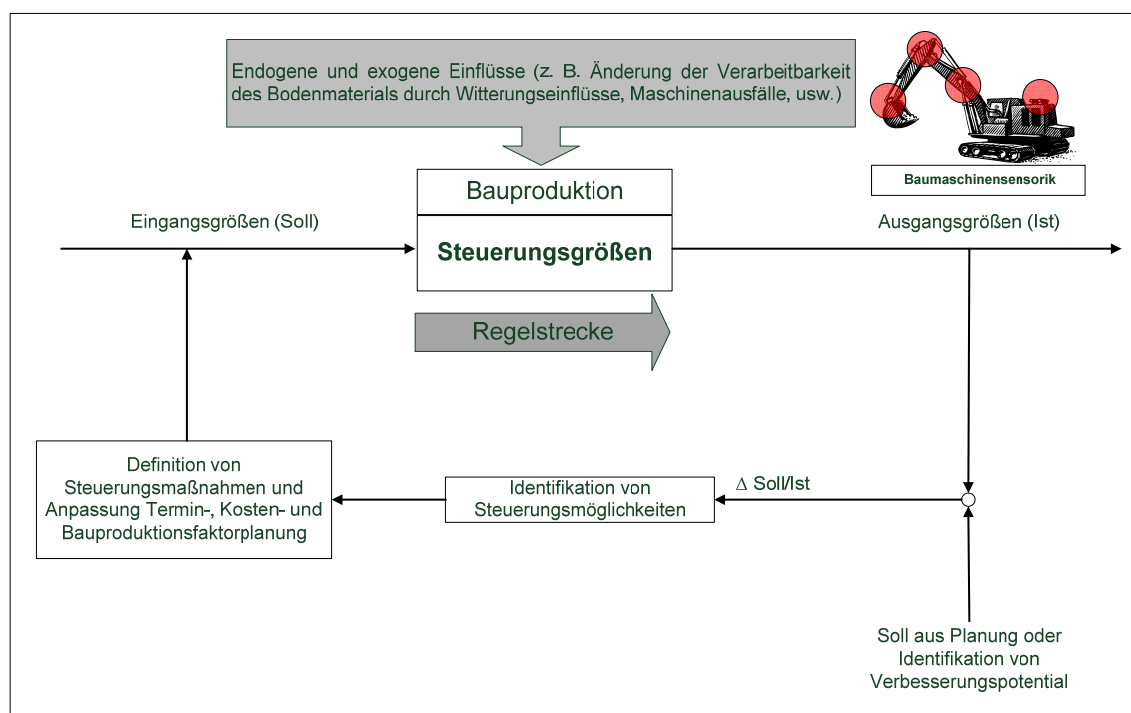


Bild 8: schematische Darstellung der Sensordatennutzung [eigene Darstellung]¹⁹

Ähnliche Beziehungen lassen sich für die weiteren Erdbaumaschinen aufstellen. Durch eine geschickte Verknüpfung (durch entsprechende Algorithmen) können somit auf Basis von Baumaschinensensordaten Gründe für Leistungsschwankungen schnell identifiziert werden oder zumindest die Identifizierung durch eine gesteigerte Transparenz unterstützt werden. Der grundsätzliche Systemablauf ist in Bild 8 schematisch abgebildet.

Obwohl die grundsätzlichen Möglichkeiten der Informationsgewinnung in den beiden obigen Beispielen (Bagger und LKW) gegeben ist, findet eine Nutzung dieser Informationen für eine gezielte Bauproduktionssteuerung aufgrund einer fehlenden Verknüpfung der zugehörigen Daten bisher nicht statt.

¹⁹ Aufbauend auf [23]

5 Fazit und Ausblick

Trotz eines stetig steigenden Zugangs zu Sensordaten von Baumaschinen und den damit verbundenen Informationen, ist deren integrale Nutzung zur Prozessverstetigung im Bauwesen bisher noch sehr stark eingeschränkt. Die Ursache hierfür sind die momentan – in Bezug auf eine gezielte Bauproduktionssteuerung – nur in einem sehr geringen Umfang existierenden Verknüpfungen der erfassten Sensordaten. Gerade bei der Entscheidung an welcher Stelle ein bestimmter Bauproduktionsfaktor eingesetzt werden soll (Ressourcenallokation), ist allerdings eine umfassende Kenntnis der Randbedingungen erforderlich. Insbesondere bei der Identifikation von Engpässen oder Ursachen von Prozessschwankungen kann ein auf geeigneten Baumaschinensensoren basierendes IT-System sehr hilfreich sein.

In Kombination mit geeigneten Algorithmen können anhand der Sensordaten dem Anwender Prozesszustände über ein geeignetes Interface kommuniziert werden. Die Analyse und Festlegung von Verbesserungsmöglichkeiten obliegt dem Mensch, dieser wird durch die gesteigerte Transparenz in seiner Entscheidungsfindung unterstützt.

Quellenverzeichnis:

- [1] Krupp, M.: Stoffstrommanagement - Effiziente Erdbewegungen auf Baustellen, BauPortal, 122(Nr.1), S. 28-30., Erich Schmidt Verlag, 2010
- [2] Rausch, P., Schreiber, F., Diegelmann, M.: Effiziente Prozessgestaltung im Erd- und Straßenbau durch den Einsatz von satellitengestützten Entscheidungsunterstützungssystemen, Wirtschaftsinformatik, Vol. 50, S. 305-313, Springer, 2008
- [3] Günthner, W. A., Kessler, S., Sanladerer, S.: EDV gestützte Fahrzeugdisposition und -abrechnung im Baubereich zur Optimierung der Prozesskette, Logistics Journal (nicht-referierte Veröffentlichungen), Online-Journal herausgegeben von WGTL - Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, Oktober, 2006
- [4] Günther, H.-O., Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik, Springer, 2009
- [5] Gehbauer, F., Kirsch, J.: Lean Construction – Produktivitätssteigerung durch schlanke Bauprozesse, Bauingenieur Band 81, S. 504-509, Springer-VDI-Verlag, 2006
- [6] Ohno, T., Stotko, E., Hof, W.: Das Toyota-Produktionssystem, Campus Verlag, 2009
- [7] Liker, J. K.: Der Toyota-Weg - 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns, FinanzBuch-Verl., 2011
- [8] Womack, J. P., Jones, D. T.: Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Free Press, 2003
- [9] REFA.: Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Darmstadt – Fachausschuß Bauwesen.: Teil 1- Grundlagen (2. Auflage.), ztv-Verlag, 1984
- [10] Girmscheid, G.: Bauproduktionstheorie – Strukturrahmen. Bauingenieur, Band 82 S. 397-403, Springer-VDI-Verlag, 2007
- [11] Girmscheid, G.: Struktur des Bauproduktionsprozesses, Bauingenieur Band 82, S. 404-413, Springer-VDI-Verlag, 2007

- [12] Girmscheid, G.: Bauproduktionstheorie – Bauproduktionsprozessplanung und -steuerung, Bauingenieur Band 83, S. 36-48, Springer-VDI-Verlag, 2008
- [13] Koskela, L.: An exploration towards a production theory and its application to construction, Dissertation der Helsinki University of Technology, 2000
- [14] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Band 1: Die Produktion, Springer, 1970
- [15] DIN EN ISO 6385, Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen
- [16] Deml, A.: Entwicklung und Gestaltung der Baulogistik im Tiefbau: Dargestellt am Beispiel des Pipelinebaus, Verlag Dr. Kovac, 2008
- [17] Ott, M.: Fertigungssystem Baustelle – Ein Kennzahlensystem zur Analyse und Bewertung der Produktivität von Prozessen, Dissertation des Karlsruher Institut für Technologie KIT, 2007
- [18] Hoffmann, M., Krause, T. (Hrsg.): Zahlentafeln für den Baubetrieb, Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [19] Pachow-Frauenhofer, J., Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A.: Grundlagen der Produktionslogistik, in Handbuch Logistik, S. 295-307, Springer, 2008
- [20] Heinen, T.: Struktur- und Layoutplanung, in Handbuch Logistik, S. 307-323, Springer, 2008
- [21] Heinen, E.: Betriebswirtschaftliche Kostenlehre – Kostentheorie und Kostenentscheidungen, Gabler Verlag, 1991
- [22] Bauer, H.: Baubetrieb, Springer, 2006
- [23] Kühn, G.: Der maschinelle Erdbau, Teubner Verlag, 1984
- [24] Günthner, W. A., Borrmann, A.: Bauen heute und morgen. Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen, Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert, Springer, 2011
- [25] Gehbauer, F.: Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulationen im Erdbau, Dissertation des Karlsruher Institut für Technologie KIT, 1974
- [26] Knaupe, W.: Erdbau, Verlag für Bauwesen Berlin, 1977
- [27] Hüster, F.: Leistungsberechnung der Baumaschinen, Shaker Verlag, 2005
- [28] Eymer, W., Schümann, M., Oppermann, S., Redlich, R.: Grundlagen der Erdbewegung, Kirschbaum Verlag, 2007
- [29] Caterpillar, I.: Caterpillar Performance Handbook, Caterpillar Inc., 2007
- [30] Girmscheid, G.: Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, Springer, 2010
- [31] Gehbauer, F.: Baubetriebsplanung und Grundlagen der Verfahrenstechnik im Hoch-, Tief- und Erdbau, Veröffentlichung des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Institut für Technologie KIT, 2004
- [32] Goldratt, E. M., Cox, J.: The Goal: A Process of Ongoing Improvement, North River Press, 2004
- [33] Arnold, D., Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen, Springer, 2009
- [34] Tommelein, I. D., Riley, D. R., Howell, G. A.: Parade game: impact of work flow variability on trade performance, Journal of construction engineering and management, September/October, ASCE, 1999