

Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements im Spezialfall Erdbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Tobias Bregenhorn

aus Freiburg

Tag der mündlichen

Prüfung: 04.02.2015

Referent: Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S.

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Karlsruhe 2015

Kurzfassung

Im Vergleich zu anderen Industriezweigen hat die Bauindustrie in den letzten Jahrzehnten nur geringe Produktivitätssteigerungen erreichen können. Insbesondere die stationäre Industrie hat durch die Einführung neuer Managementmethoden enorme Verbesserungen verbuchen können. Ein wesentlicher Verbesserungstreiber der stationären Industrie war der Sektor Logistik und innerhalb dieses Sektors im speziellen die Anwendung von Lean Management. Aufgrund der offensichtlichen Vorteile, die die stationäre Industrie durch die Implementierung von Lean Management realisieren konnte, ist das Interesse des Bauwesens an Lean Management kontinuierlich gewachsen. Aus dieser Neugierde heraus ist die internationale Bewegung um Lean Construction (im deutschsprachigen Raum insbesondere unter dem Namen Lean Management im Bauwesen bekannt) entstanden. Obwohl die Adaption von Lean Management an das Bauwesen noch lange nicht abgeschlossen ist, konnten bereits einige Erfolge verbucht werden. Insbesondere das sog. Last Planner System hat gezeigt, wie eine Übertragung der Lean Management Prinzipien auf die Bauproduktionsplanung und -steuerung erfolgen kann. Die bisherigen Anwendungen von Lean Management im Bauwesen haben den Hochbau fokussiert und dabei den Erdbau als einen wesentlichen Teil des Bauwesens vernachlässigt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Themengebiet Bauproduktionsplanung und –steuerung im Erdbau. Innerhalb dieses Themengebiets hat die Arbeit insbesondere die zwei Hauptziele:

1. Deduktive Analyse der Wirkungsmechanismen der Lean Management Prinzipien und Methoden
2. Die Ableitung von exemplarischen Handlungsempfehlungen bei der Implementierung von Lean Management

Die Ergebnisse des ersten Hauptziels sind generischer Natur, wohingegen die Ergebnisse des zweiten Hauptziels spezifischer auf das Umfeld des schweren Erdbaus angepasst wurden. Dennoch können auch die Ergebnisse des zweiten Hauptziels auf andere Fachbereiche innerhalb des Bauwesens übertragen werden.

In Kapitel 1 wird auf die Punkte Motivation, Zielsetzung und Abgrenzung, Vorstellung des Forschungsmodells und der Aufbau und die Gliederung der Arbeit genauer eingegangen. Das 2. Kapitel fasst die Grundlagen des Lean Managements im Bauwesen zusammen. Kapitel 3 bietet einen Überblick zu dem Thema Bauproduktionsplanung und -steuerung mit einem speziellen Fokus auf das Produktionsumfeld des schweren Erdbaus. Um ein besseres Verständnis von den Problemen des Erdbaus zu erhalten, findet in Kapitel 4 eine Analyse der IST-Situation des Erdbaus statt. Die deduktive Analyse der Wirkungsmechanismen der Lean Management Prinzipien und Methoden findet in Kapitel 5 statt. Anschließend wird in Kapitel 6 erläutert, wie eine exemplarische Umsetzung von Lean Management im Erdbau erfolgen kann. Abschließend wird in Kapitel 7 ein Fazit über die Ergebnisse der Arbeit gezogen und ein Ausblick für weitere Forschungsvorhaben gegeben.

Abstract

Compared to other industries the construction industry had low productivity improvement during the last forty years. Meanwhile, other industries have achieved significant performance improvements through the implementation of new management approaches. One major improvement in these industries has been the sector of logistics and within this sector especially the application of lean management. Due to the apparent benefits that other industry sectors have reaped through the implementation of Lean Management, the construction industry has become more and more interested in this topic. Out of this curiosity the Lean Construction movement has been born. Still an ongoing endeavor to adapt Lean Management to the new conditions of the construction industry, there has been some major results. Especially the so called Last Planner System has shown how the Lean Management principles can be transferred to production planning and control in construction. However, the application of Lean Construction has so far mostly focused on building construction, neglecting earthworks as a major part of the construction industry.

The focus of this thesis is on production planning and control in earthworks. In particular the thesis has two major purposes:

1. Analyze from a deductive point of view how the principles and methods of Lean Management work in general in the area of construction.
2. Deduction of exemplary recommendations for action for the implementation of Lean Management.

The results of the first item are generic whereas the results of the second item are more specific for the case of production planning and control in earthworks. Nevertheless, the results of the second item can also be adapted to other areas of construction.

Chapter 1 presents motivation, demarcation, methodology and the structure of the thesis. Chapter 2 discusses the basics of lean construction. The 3rd chapter gives an overview about production planning and control in construction with a special focus on earthworks. For a better understanding the current situation of earthworks is shown in chapter 4. The deductive analysis of the principles and methods of lean construction takes place in chapter 5. Subsequently, in chapter 6 an exemplary implementation of Lean Management in earthworks is shown. Finally in chapter 7 the conclusion of the thesis takes place and an outlook for future research projects is given.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand hauptsächlich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer für die Übernahme des Hauptreferats. Seine Anregungen und die gemeinsamen intensiven Diskussionen haben maßgeblich dazu beigetragen, dass diese Promotionsschrift in dieser Form entstanden ist.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes für die Übernahme des Korreferats und seine inhaltlichen Anregungen sowie seine sonstige Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza und Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann für die Übernahmen des Nebenreferats. Die stattgefundenen Diskussionen haben sehr zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Die Verwirklichung dieser Arbeit wäre ohne den intensiven Austausch mit meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt Gernot Hickethier, Annett Schöttle, Markus Reinhardt, Daniel Knecht, Kim Kirchbach, Heiner Schlick, Alexander Lange, Michael Denzer, Harald Schneider, Steffen Reinhard und Patrick Kern.

Große Dankbarkeit gilt meinen Eltern, die mir das Studium und damit den Einstieg in die Wissenschaft ermöglicht haben.

Abschließend gilt große Dankbarkeit meine Frau Stephanie Bregenborn, die durch ihre Geduld und Unterstützung in Form von inhaltlichen, strukturellen und stilistischen Diskussionen zum Abschluss dieser Arbeit wesentlich beigetragen hat.

Basel, den 20.12.2014

Tobias Bregenborn

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Abgrenzung	4
1.3 Vorstellung des Forschungsmodells	5
1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit	6
2 Lean Management im Bauwesen	7
2.1 Historie.....	7
2.2 Prinzipien	8
2.2.1 Kontinuierliche Verbesserung.....	9
2.2.2 Definition von Verschwendung.....	11
2.2.3 Wertvorstellung	13
2.3 Regelsätze.....	14
2.4 Wirkungsebenen und Methoden von Lean Management im Bauwesens	18
2.4.1 Gezielte Gestaltung des Informationsaustauschs.....	19
2.4.2 Ordnung und Sauberkeit	20
2.4.3 Wurzelfehleranalyse.....	20
2.4.4 Wertstromanalyse bzw. Wertstromdesign	21
2.4.5 Last-Planner-System™.....	21
2.4.6 Visuelles Management	23
2.4.7 Building Information Modeling.....	24
2.4.8 Vertragliche Gestaltung	25
2.5 Transformation-Flow-Value Theorie.....	27
2.5.1 Theorie der Transformation	27
2.5.2 Flusstheorie	28
2.5.3 TFV-Modell	29
2.5.4 Begründung der Wahl der TFV-Theorie als gewählte Produktionstheorie	29
2.6 Allgemeine Ursachen von Verschwendung in Produktionsvorgängen.....	30

3	Generische Modellierung der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung im schweren Erdbau	34
3.1	Bauproduktion als Wertschöpfungsprozess	34
3.1.1	Bauproduktionsfaktoren	37
3.1.2	Einflüsse auf das Bauproduktionssystem Erdbau	40
3.2	Bauproduktionsplanung	44
3.2.1	Grundlagenermittlung	46
3.2.2	Anforderungsanalyse	48
3.2.3	Identifizierung der grundsätzlich geeigneten Kombinationen der Bauproduktionsverfahren	48
3.2.4	Bauproduktionsfaktorallokation	49
3.2.5	Bewertung der einzelnen Kombinationen	55
3.3	Bauproduktionssteuerung	57
3.3.1	Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Bauproduktionsprozessen	59
3.3.2	Entwicklung der Kosten in der Bauproduktion	62
3.3.3	Ressourcen Allokation in der Bauproduktionssteuerung	64
4	Analyse der IST-Situation des Erdbaus	70
4.1	Technische Entwicklungen im Erdbau	70
4.2	Identifikation von Optimierungspotential im Erdbau anhand von Baustellenbeobachtungen und Interviews	71
4.3	Kritik an der traditionellen Vorgehensweise in der Bauproduktionsplanung und -steuerung	73
5	Wirkungsmechanismen einer Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien	80
5.1	Weiterführende Analyse einzelner grundlegender Wirkungsmechanismen	80
5.1.1	Minimierung von Verschwendung	80
5.1.2	Minimierung von Variabilität	86
5.1.3	Pull-Prinzip	93
5.2	Prozessoptimierung	118
5.3	Flussoptimierung	129
6	Exemplarische Umsetzung von Lean Management im Erdbau	151
6.1	Umsetzung des Pull-Prinzips	151
6.1.1	Zuordnung von Leerfahrzeugen	151
6.1.2	Zuordnung von beladenen Transportfahrzeugen	154
6.1.3	Der Zwei-Wege-Pull	160
6.2	Exemplarischer Ablauf einer Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements	162
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	166

7.1	Zusammenfassung.....	166
7.2	Fazit und Ausblick.....	167
	Literaturverzeichnis	a
8	Anhang.....	i
	Anhang 1 - Beispielhafte Berechnung bzgl. Einsatz-Flexibilität.....	i
	Anhang 2 - Der Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Leistung	iii
	Anhang 3 - Quellcode: Variante 1.....	vi
	Anhang 4 - Quellcode: Variante 2.....	viii
	Anhang 5 - Quellcode: Variante 3.....	ix
	Anhang 6 - Quellcode: Variante 4.....	xi
	Anhang 7 - Quellcode: Variante 5.....	xvi
	Anhang 8 - Quellcode: Variante 6.....	xix
	Anhang 9 - Quellcode: Pull-Mechanismus für Leerfahrzeuge	xxi
	Anhang 10 – Detaillierte Erläuterung der Simulationsergebnisse von Kapitel 6.1.1	xlii
	Anhang 11 - Analyse der Auswirkung der Reduktion von Standardabweichungen von Prozesszeiten anhand der diskreten Ereignis-Simulation	liv
	Anhang 12 -Quellcode: Flussoptimierung	lvii
	Anhang 13 – Detaillierte Erläuterung der Simulationsergebnisse von Kapitel 6.1.2	lxiv
	Anhang 14 -Verifizierung und Validierung der Simulationen	xc

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: ENTWICKLUNG DER DURCHSCHNITTlichen Einnahmen des Baugewerbes im Vergleich zum sonstigen produzierenden Gewerbe.....	2
ABBILDUNG 1-2: DARSTELLUNG DES WISSENSCHAFTlichen Vorgehens	5
ABBILDUNG 2-1: DIE DREI Ebenen zur Unterscheidung zwischen Prinzipien, Regeln und Methoden	9
ABBILDUNG 2-2: Wirkungslogik kontinuierlicher Produktionsverbesserung (vgl. (Erlach 2007)).....	10
ABBILDUNG 2-3: DIE Unterscheidung der kontinuierlichen Verbesserung in zwei Ebenen (Rother & Shook 2004)	11
ABBILDUNG 2-4: DIE DREI „Ms“ (Liker 2009).....	13
ABBILDUNG 2-5: Wirkungsebenen von Lean Management im Bauwesen (Lichtig & Kievet 2012).....	18
ABBILDUNG 2-6: Schematische Darstellung des Last Planner Systems (vgl. (Gehbauer 2008)).....	23
ABBILDUNG 2-7: Exemplarische Darstellung eines Bauproduktionsprozesses als Transformationsprozess (Börkircher 2011).....	28
ABBILDUNG 3-1: Das Bauproduktionssystem	36
ABBILDUNG 3-2: Schematische Darstellung der Arbeitsstationen des Arbeitssystems „M“	37
ABBILDUNG 3-3: Die Bauproduktionsfaktoren.....	38
ABBILDUNG 3-4: Kategorisierung der Einflüsse, die auf ein Bauproduktionssystem wirken	40
ABBILDUNG 3-5: Einflussfaktoren der Bauproduktion.....	42
ABBILDUNG 3-6: Kontinuierliche Darstellung der Leistungsfähigkeit der Bauproduktionsfaktoren	43
ABBILDUNG 3-7: Ablauf bei der Bestimmung eines Bauverfahrens	45
ABBILDUNG 3-8: Ermittlung der Randbedingungen im schweren Erdbau	47
ABBILDUNG 3-9: Zusammenhang zwischen Bauproduktionshaupt-, Bauproduktionssubprozess und Arbeitsstation ...	50
ABBILDUNG 3-10: Produktionsprozessabhängigkeiten	52
ABBILDUNG 3-11: Exemplarisches diskretisiertes Modell der Auslastung eines Bauproduktionsfaktors	54
ABBILDUNG 3-12: Kybernetischer Regelkreis im Erdbau (in Anlehnung an (Gehbauer 1974), (Girmscheid 2010b) und (Girmscheid 2010a)).....	58
ABBILDUNG 5-1: Zwei Alternativen für Fall 3.....	83
ABBILDUNG 5-2: Quantile als Entscheidungsgrundlage der Alternativen	85
ABBILDUNG 5-3: Unter den jeweiligen Randbedingungen erreichte Leistung eines Bauproduktionsfaktors, Prinzipskizze	87
ABBILDUNG 5-4: Histogramm der Leistungswerte aus Abbildung 5-3, Prinzipskizze	87
ABBILDUNG 5-5: Erreichbare Auslastung eines Bauproduktionsfaktors für bestimmte Servicegrade γ , in Abhängigkeit von des Variationskoeffizienten des Vorgängerprozesses.....	90
ABBILDUNG 5-6: Optimale Produktionsmenge Q^* in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Kosten pro überschüssiger Einheit und Kosten pro mangelnder Einheit	96
ABBILDUNG 5-7: Entwicklung des Vertrauensintervalls für den Mittelwert in Abhängigkeit des Planungshorizonts	101
ABBILDUNG 5-8: Materialbestandentwicklung in Abhängigkeit des Planungshorizonts	103
ABBILDUNG 5-9: Entwicklung des Vertrauensintervalls für den Mittelwert in Abhängigkeit des Planungshorizonts und in Abhängigkeit des sinkenden Informationsgehalts	107
ABBILDUNG 5-10: Einfluss des überproportionalen Abfalls des Informationsgehalts ab einem gewissen Zeitpunkt ..	110
ABBILDUNG 5-11: Die zeitabhängige Entwicklung der Vertrauensintervalle und des Mittelwerts einer prognostizierten Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen	112
ABBILDUNG 5-12: Ablauf der kontinuierlichen Verbesserung durch Implementierung des Pull-Prinzips	116
ABBILDUNG 5-13: Unterschied der Erfassung der Randbedingungen für einen Bauproduktionsprozess „P“ zwischen traditioneller Vorgehensweise und Vorgehensweise im LPS	121
ABBILDUNG 5-14: Wirkungsmechanismus des Last Planner Systems	128
ABBILDUNG 5-15: Arten des funktionalen Zusammenhangs zwischen Losgröße und Erwartungswert der Prozessdauer	130

ABBILDUNG 5-16: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VARIANTE 1.....	132
ABBILDUNG 5-17: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON VARIANTE 1	133
ABBILDUNG 5-18: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VARIANTE 2.....	134
ABBILDUNG 5-19: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON VARIANTE 2	135
ABBILDUNG 5-20: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON VARIANTE 3	136
ABBILDUNG 5-21: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON VARIANTE 4	138
ABBILDUNG 5-22: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VARIANTE 5.....	140
ABBILDUNG 5-23: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VARIANTE 6.....	143
ABBILDUNG 5-24: QUALITATIVER EINFLUSS VON VERSPÄTETER FERTIGSTELLUNG AUF DIE ENTWICKLUNG DER GESAMTDAUER DER PRODUKTION	147
ABBILDUNG 6-1: SIMULATIONS-AUFBAU	152
ABBILDUNG 6-2: PUSH-PRINZIP BEI TRADITIONELLER BAUPRODUKTION.....	154
ABBILDUNG 6-3: UMSETZUNG DES PULL-PRINZIPS DURCH DIE CONWIP-METHODE	155
ABBILDUNG 6-4: : DAS ZWEI-WEGE-PULL-SYSTEM – PULL AUF KNOTEN	161
ABBILDUNG 6-5: DAS ZWEI-WEGE-PULL-SYSTEM – PULL AUF PROZESSE	161
ABBILDUNG 6-6: ABLAUF EINER BAUPRODUKTIONSPLANUNG UND -STEUERUNG NACH DEN PRINZIPIEN DES LEAN MANAGERMENTS	163
ABBILDUNG 6-7: INTEGRATION DER WOCHEN- /TAGESPLANUNG DES LPS.....	165
ABBILDUNG 8-1: AUFBAU DES PRODUKTIONSSYSTEMS BEI UNTERSCHIEDLICHER EINSATZ-FLEXIBILITÄT	I
ABBILDUNG 8-2: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PROZESSDAUER UND LOSGRÖßE UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND LOSGRÖßE	IV
ABBILDUNG 8-3: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PROZESSDAUER UND LEISTUNG FÜR EINE LOSGRÖßE VON 30 EINHEITEN.....	V
ABBILDUNG 8-4: WARTEZEITENENTWICKLUNG BAGGER 1 FÜR VARIANTE 1	XLII
ABBILDUNG 8-5: WARTEZEITENENTWICKLUNG BAGGER 2 FÜR VARIANTE 1	XLII
ABBILDUNG 8-6: WARTEZEITENENTWICKLUNG DER LKW FÜR VARIANTE 1	XLIII
ABBILDUNG 8-7: WARTEZEITENENTWICKLUNG DER LKW VON LINIE 1 PRO SIMULATIONS-DURCHLAUF FÜR VARIANTE 1.....	XLIII
ABBILDUNG 8-8: WARTEZEITENENTWICKLUNG DER LKW VON LINIE 2 PRO SIMULATIONS-DURCHLAUF FÜR VARIANTE 1.....	XLIV
ABBILDUNG 8-9: ZWISCHENANKUNFTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 1 FÜR VARIANTE 1	XLIV
ABBILDUNG 8-10: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENANKUNFTSZEITEN ≥ 600 [s] FÜR LINIE 1 FÜR VARIANTE 1	XLV
ABBILDUNG 8-11: ZWISCHENANKUNFTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 2 FÜR VARIANTE 1	XLV
ABBILDUNG 8-12: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENANKUNFTSZEITEN ≥ 600 [s] FÜR LINIE 2 FÜR VARIANTE 1	XLVI
ABBILDUNG 8-13: HISTOGRAMM DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 1 FÜR VARIANTE 1	XLVI
ABBILDUNG 8-14: HISTOGRAMM DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 2 FÜR VARIANTE 1	XLVII
ABBILDUNG 8-15: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN ≥ 400 [s] FÜR LINIE 1 FÜR VARIANTE 1	XLVII
ABBILDUNG 8-16: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN ≥ 400 [s] FÜR LINIE 2 FÜR VARIANTE 1	XLVIII
ABBILDUNG 8-17: WARTEZEITENENTWICKLUNG BAGGER 1 FÜR VARIANTE 2	XLVIII
ABBILDUNG 8-18: WARTEZEITENENTWICKLUNG BAGGER 2 FÜR VARIANTE 2	XLIX
ABBILDUNG 8-19: WARTEZEITENENTWICKLUNG DER LKW FÜR VARIANTE 2	XLIX
ABBILDUNG 8-20: ZWISCHENANKUNFTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 1 FÜR VARIANTE 2	L
ABBILDUNG 8-21: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENANKUNFTSZEITEN ≥ 600 [s] FÜR LINIE 1 FÜR VARIANTE 2	L
ABBILDUNG 8-22: ZWISCHENANKUNFTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 2 FÜR VARIANTE 2	LI
ABBILDUNG 8-23: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENANKUNFTSZEITEN ≥ 600 [s] FÜR LINIE 2 FÜR VARIANTE 2.....	LI
ABBILDUNG 8-24: HISTOGRAMM DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 1 FÜR VARIANTE 2.....	LII
ABBILDUNG 8-25: HISTOGRAMM DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN DER LKW AN BAGGER 2 FÜR VARIANTE 2	LII
ABBILDUNG 8-26 : ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN ≥ 400 [s] FÜR LINIE 1 FÜR VARIANTE 2	LII
ABBILDUNG 8-27: ISOLIERTE DARSTELLUNG DER ZWISCHENABFAHRTSZEITEN ≥ 400 [s] FÜR LINIE 2 FÜR VARIANTE 2	LIII
ABBILDUNG 8-28: ENTWICKLUNG DER MITTELWERTE DER WARTEZEITEN VON BAGGER 1 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STANDARDABWEICHUNG ALLER PROZESSZEITEN	LIV
ABBILDUNG 8-29: ENTWICKLUNG DER MITTELWERTE DER WARTEZEITEN VON BAGGER 2 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STANDARDABWEICHUNG ALLER PROZESSZEITEN	LV
ABBILDUNG 8-30: ENTWICKLUNG DER STANDARDABWEICHUNG DER WARTEZEITEN VON BAGGER 1 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STANDARDABWEICHUNG ALLER PROZESSZEITEN	LVI

ABBILDUNG 8-31: ENTWICKLUNG DER STANDARDABWEICHUNG DER WARTEZEITEN VON BAGGER 2 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STANDARDABWEICHUNG ALLER PROZESSZEITEN	LVI
ABBILDUNG 8-32: QUALITATIVE DARSTELLUNG DES ZUSAMMENHANGS DER CONWIP-LIMITIERUNG UND DER ENTWICKLUNG DER ZWISCHENFERTIGSTELLUNGSZEITEN	LXXII
ABBILDUNG 8-33: SIMULIERTE WARTEDAUERN DES BAGGERS VON LINIE 1	XCIV
ABBILDUNG 8-34: SIMULIERTE WARTEDAUERN DES BAGGERS VON LINIE 2	XCV

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: DIE DREI SICHTWEISEN AUF EINE PRODUKTION (IN ANLEHNUNG AN (KOSKELA 2000)).....	29
TABELLE 5-1: SIMULATIONSERGEBNISSE MIT UNTERSCHIEDLICHEN VARIATIONSKOEFFIZIENTEN UND LOSGRÖßEN FÜR VARIANTE 4 (ZE=ZEITEINHEITEN)	139
TABELLE 5-2: SIMULATIONSERGEBNISSE FÜR DEN IN TABELLE 5-1 DARGESTELLTEN PRODUKTIONSAUSSCHNITT MIT PUFFERBEGRENZUNG „1“ ZWISCHEN DEN EINZELNEN PROZESSEN FÜR VARIANTE 5 (ZE=ZEITEINHEITEN)	141
TABELLE 5-3: SIMULATIONSERGEBNISSE FÜR DIE EINHEITLICHE PUFFERGRÖßE „3“ FÜR VARIANTE 5 (ZE=ZEITEINHEITEN)	142
TABELLE 5-4: SIMULATIONSERGEBNISSE FÜR VARIANTE 6 FÜR DEN IN ABBILDUNG 5-23 DARGESTELLTEN PRODUKTIONSAUSSCHNITT MIT ABSOLUTER PUFFERBEGRENZUNG „7“ (ZE=ZEITEINHEITEN)	144
TABELLE 5-5: SIMULATIONSERGEBNISSE FÜR DIE EINHEITLICHE PUFFERGRÖßE „3“ FÜR VARIANTE 6 (ZE=ZEITEINHEITEN)	145
TABELLE 8-1: ZUSÄTZLICHE SIMULATIONSERGEBNISSE VON VARIANTE 4	XIV
TABELLE 8-2: ZUSÄTZLICHE SIMULATIONSERGEBNISSE VON VARIANTE 4	XV
TABELLE 8-3: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP	LXVI
TABELLE 8-4: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT=ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE)	LXVII
TABELLE 8-5: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT=4/5 x ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE)	LXIX
TABELLE 8-6: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT= 25 TRANSPORTFAHRZEUGE)	LXX
TABELLE 8-7: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT= 3 TRANSPORTFAHRZEUGE)	LXXI
TABELLE 8-8: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „LÖSEN&LADEN“ UM 10%	LXXIV
TABELLE 8-9: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „LÖSEN&LADEN“ UM 25%	LXXV
TABELLE 8-10: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG = ANZAHL DER EINGESETZTEN TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „LÖSEN&LADEN“ UM 10%.....	LXXVI
TABELLE 8-11: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG = ANZAHL DER EINGESETZTEN TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „LÖSEN&LADEN“ UM 25%.....	LXXVII
TABELLE 8-12: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 10%.....	LXXVIII
TABELLE 8-13: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 25%.....	LXXIX
TABELLE 8-14: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT= ANZAHL TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 10%	LXXX
TABELLE 8-15: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-WERT= ANZAHL TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 25%	LXXXI
TABELLE 8-16: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „VERTEILEN“ UM 10%.....	LXXXIII
TABELLE 8-17: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG = ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE FÜR DIE STEIGERUNG DER PROZESSDAUERN VON „VERTEILEN“ UM 10%	LXXXIV
TABELLE 8-18: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „LADEN&LÖSEN“ UM 10%	LXXXV
TABELLE 8-19: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG= ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „LADEN&LÖSEN“ UM 10%.....	LXXXVI
TABELLE 8-20: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 10%.....	LXXXVII

TABELLE 8-21: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG= ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „TRANSPORTIEREN“ UM 10%	LXXXVIII
TABELLE 8-22: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PUSH-PRINZIP FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „VERTEILEN“ UM 10%.....	LXXXIX
TABELLE 8-23: ERGEBNIS DER SIMULATION FÜR EINE STEUERUNG NACH DEM PULL-PRINZIP (CONWIP-LIMITIERUNG = ANZAHL DER TRANSPORTFAHRZEUGE) FÜR DIE SENKUNG DER PROZESSDAUERN VON „VERTEILEN“ UM 10%	XC

Abkürzungsverzeichnis

AVR	Abschreibung Verzinsung und Reparatur
BIM	Building Information Modeling
BPPS	Bauproduktionsplanungs- und Bauproduktionssteuerungssystem
bzgl.	bezüglich
DESTATIS	Statistische Bundesamt Deutschland
DLZ	Durchlaufzeit
d.h.	das heißt
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FIFO	first-in-first-out
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Global Positioning Systems
IFOA	Integrated Form of Agreement
insb.	insbesondere
IPD	Integrated Project Delivery
IT	Informationstechnologien
JIT	Just-in-time
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LM	Lean Management
LMB	Lean Management im Bauwesen
LPDS	Lean Project Delivery System
LPS	Last Planner System
MRP 1	Material Requirements Planning
MRP 2	Manufacturing Resources Planning
OPF	One-Piece-Flow
PEA	Prozent erledigter Arbeiten
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
TPM	Total Productive Maintenance
vgl.	vergleiche
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WBS	Work Breakdown Structure
z.B.	zum Beispiel
ZFZ	Zwischenfertigstellungszeit

1 Einleitung

1.1 Motivation

Globalisierung in Kombination mit verbesserten Logistiksystemen und dem Abbau von Handelsbarrieren hat in der stationären Industrie zu nahezu weltweitem Wettbewerb und damit indirekt zu hohem Rationalisierungsdruck geführt. Auch wenn dieser Trend nur bis zu einem gewissen Grad auf das Bauwesen übertragbar ist, da Baustellen naturgemäß ortsgebunden sind, gibt es ähnliche Entwicklungen wie in der stationären Industrie.

Das Statistische Bundesamt Deutschland (DESTATIS) veröffentlicht regelmäßig Zahlen zu Betriebsanzahl, tätigen Personen und Umsatz im Baugewerbe. Betrachtet man die Entwicklungen der bezüglich des Baugewerbes veröffentlichten Zahlen des DESTATIS, so ist festzustellen, dass in den Jahren 1991 bis 2012 ein deutlicher Rückgang der Anzahl der Erwerbstätigen im Baugewerbe stattgefunden hat. Die Anzahl der Erwerbstätigen ist von ca. 1,28 Mio. Personen auf ca. 0,74 Mio¹. Personen gesunken (dies entspricht einem Rückgang von ca. 42 %). Die baugewerblichen Umsätze sind im identischen Zeitraum relativ konstant geblieben mit erhöhten Umsätzen in den Jahren 1992 bis 2000, was sich vermutlich auf die Auswirkung der Wiedervereinigung zurückführen lässt (1991 → ca. 85 Mrd. EUR und 2012 → ca. 92,6 Mrd. EUR). Im Tiefbau beträgt der Rückgang der geleisteten Arbeitsstunden im gleichen Zeitraum ca. 45 % bei gering schwankenden Umsätzen (1991 → ca. 30,6 Mrd. EUR und 2012 → ca. 33,5 Mrd. EUR).²

Insbesondere der europäische Binnenmarkt hat zu einem hohen Rationalisierungsdruck auf das deutsche Baugewerbe geführt. Ein Problem sind die im Vergleich zu den anderen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union hohen Lohnkosten in Deutschland. Technologievorsprünge reichen alleine nicht aus, um langfristig konkurrenzfähig zu bleiben. Das deutsche Baugewerbe kann langfristig nur bestehen, wenn neben der Entwicklung geeigneter Technologien Abläufe effizienter gestaltet werden und gleichzeitig die Vorteile der Marktnähe genutzt werden, um zuverlässiger und flexibler auf dem Markt agieren zu können.

Vergleicht man die Entwicklungen der stationären Industrie mit dem Bauwesen, so wird deutlich, dass die stationäre Industrie ausgeprägte Logistikkonzepte besitzt, um ihre Prozesse effizienter zu gestalten. Eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Logistikkonzepte haben die innerhalb der Supply Chains „starken“ Positionen der dem Endkunden vorgelagerten Unternehmen gespielt³. Die Supply Chains im Bauwesen zeichnen sich hingegen durch eine viel stärkere Dynamik und Diversifikation aus. Konzepte, die wie herkömmliche ERP-Systeme (Enterprise-Resource-Planning) auf einem rein hierarchischen Zentralplanungsverfahren beruhen, sind im Bauwesen aufgrund der hohen vorhandenen Dynamik nicht zu einem großflächigen Einsatz gekommen.

¹ vgl. (DESTATIS 2012a).

² vgl. (DESTATIS 2012a). Diese Zahlen beinhalten keine Inflationsbereinigung. Geht man von einer jährlichen Inflationsrate von ca. 3 % aus, so beträgt die gesamte Inflation in einem Zeitraum von 21 Jahren ca. 46,2 %. Somit hat sich der Umsatz real um ca. 41 % verringert. Hieraus könnte ein Zusammenhang zwischen Umsatzrückgang (ca. 41%) und Rückgang der geleisteten Arbeitsstunden (ca. 45%) abgeleitet werden. Der real erwirtschaftete Umsatz pro Arbeitsstunde wäre somit fast identisch geblieben.

³ vgl. (Formoso & Isatto 2009).

Die Entwicklung der durchschnittlichen Einnahmen je geleisteter Arbeitsstunde ist in den Jahren 1970 bis 2011 für das Baugewerbe im Vergleich zum sonstigen produzierenden Gewerbe deutlich niedriger ausgefallen (vgl. Abbildung 1-1).

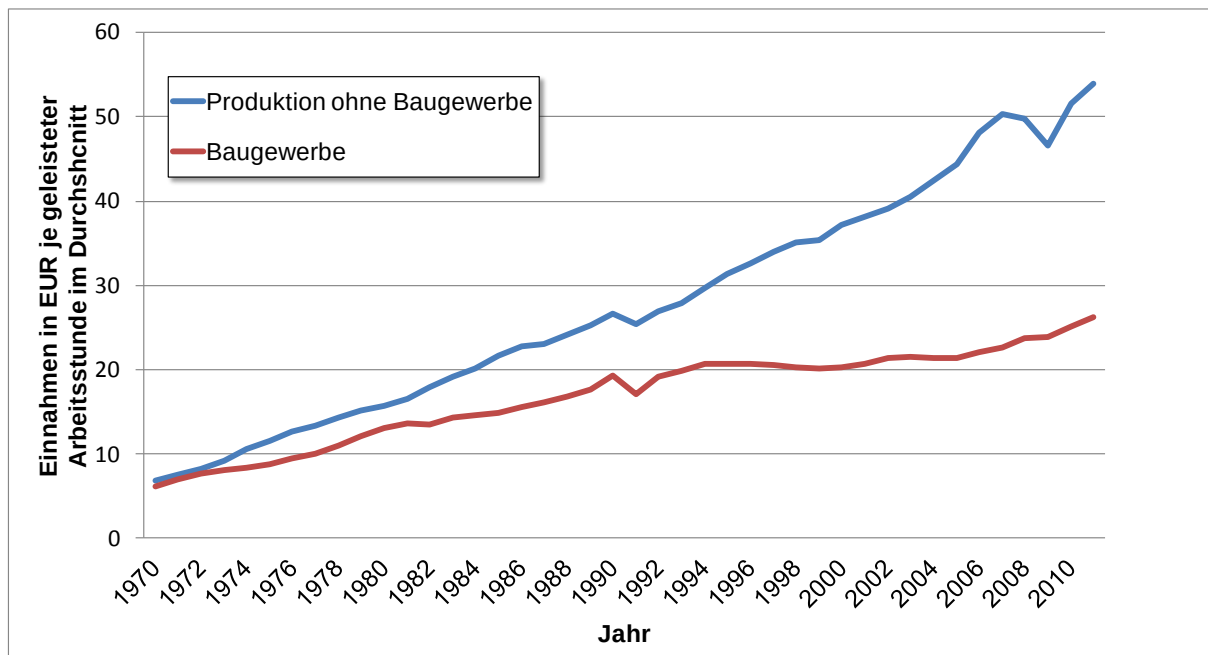


Abbildung 1-1: Entwicklung der durchschnittlichen Einnahmen des Baugewerbes im Vergleich zum sonstigen produzierenden Gewerbe⁴

Das Gebiet der Baulogistik ist bisher nur rudimentär erforscht. Gleichzeitig besteht Bauen zu einem Großteil aus logistischen Prozessen. Gerade in Deutschland kann aufgrund des hohen Qualifikationsgrades des Personals ein enormes Verbesserungspotential durch die Anwendung geeigneter Managementansätze aktiviert werden. Während in der stationären Industrie die Anwendung von Lean Management zu deutlichen Prozessverbesserungen geführt hat, sind diese Potentiale im Bauwesen bisher nahezu ungenutzt geblieben. Die Konzepte des Lean Managements haben das Ziel, die in Produktionsprozessen vorhandene Verschwendung kontinuierlich zu minimieren.

Ein weiterer Punkt, der insbesondere längerfristig zu beachten ist, ist die Verknappung von Ressourcen. Eine Verknappung von Ressourcen hat zur Folge, dass Ressourcen teurer werden und somit auch die Verschwendung von Ressourcen. Dies wird langfristig einen weiteren „Optimierungsdruck“ auf die produzierenden Unternehmen ausüben.

Analysiert man die historische Veränderung der (Erd-)Baumaschinen, so stellt man fest, dass diese sich nicht grundlegend verändert haben. Zwar haben sich Antriebstechnik, Sensorik und der Grad der Vernetzung der Sensorik kontinuierlich verbessert, dennoch sind die grundsätzlichen Funktionalitäten identisch geblieben⁵. Somit stellt sich die Frage, mit welchen Innovationen ein realer Wettbewerbsvorteil realisiert werden kann.

Das zentrale Ziel von Lean Management ist die Erhöhung des Anteils der Wertschöpfung. Wertschöpfung entsteht am Ort der Produkterstellung. Viele der heutigen Entwicklungen neigen allerdings dazu, dies zu vergessen, sie versuchen durch ungeeignete Methoden „Prozessverbesserungen“

⁴ Die Daten stammen aus (DESTATIS 2012b). Eine Veränderung des Preisindexes wurde nicht berücksichtigt, d.h. die Einnahmen in EUR je geleisteter Arbeitsstunde beziehen sich immer auf das jeweilige Jahr. Ähnliche Zahlen präsentiert (Teicholz 2004) für die US-amerikanische Bauindustrie.

⁵ vgl. (Tatum et al. 2006).

herbeizuführen. Der Grund für diesen Sachverhalt liegt darin, dass das heutige Management teilweise zum Selbstzweck geworden ist und dabei die eigentliche Aufgabe des Managements in den Hintergrund geraten ist, nämlich die Unterstützungsfunktion. Das Ziel von Management ist, die Bedingungen der Werterstellung zu optimieren, d.h. durch Implementierung geeigneter Maßnahmen dazu beizutragen, dass diejenigen Personen, die direkt an der Werterstellung beteiligt sind, möglichst unter optimalen Bedingungen arbeiten können.

Die hier vorliegende Arbeit analysiert exemplarisch, warum es vorteilhaftig ist, das Gedankengut von Lean Management auf das Produktionssystem Baustelle zu übertragen und wie dies exemplarisch im Erdbau umgesetzt werden kann.

1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Abgrenzung

Obwohl die Praxis der Baulogistik einen wesentlichen Einflussfaktor zuschreibt (vgl. (Günthner & Zimmermann 2008)), befindet sich die Umsetzung von standardisierten logistischen Planungs- und Steuerungsmethoden im Bauwesen noch am Anfang.

In der stationären Industrie konnten sich erfolgreiche Planungs- und Steuerungsmethoden etablieren, die zu einem deutlichen Leistungsanstieg geführt haben. Der Großteil der stationären Industrie hat in seiner Entwicklung zentrale Planungsinstrumente eingeführt, die die Aufgaben der Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung sowie Prozesssteuerung sequentiell und iterativ ausführen (z.B. Material Requirements Planning (MRP 1) und Manufacturing Resources Planning (MRP 2)). Hieraus entstanden allerdings Probleme, da eine Kopplung zwischen Lenkungs- und Ausführungsebene in den meisten Fällen nicht gegeben ist⁶. In den seltensten Fällen stimmen die zentral geplanten und gesteuerten Sachverhalte mit der Realität überein. Dies resultiert daher, dass zentrale Planungs- und Steuerungsmethoden immer von einer modellhaften Weltanschauung ausgehen. In der Praxis hat dies zur Entwicklung von dezentralen Planungs- und Steuerungsverfahren geführt, um die Nachteile der zentralen Verfahren zu überwinden.

In der Bauwirtschaft kamen IT-basierte zentrale Planungs- und Steuerungsmethoden aufgrund der vorherrschenden Dynamik bisher nur geringfügig zur Anwendung. Bauprojekte haben Unikatcharakter und benötigen daher Planungs- und Steuerungsmethoden, die dies berücksichtigen. Bei der Realisierung eines Bauvorhabens arbeiten unterschiedliche Disziplinen in unterschiedlichen Konstellationen zusammen. Der Unikatcharakter und die unterschiedliche Zusammenstellung der Projektbeteiligten widersprechen einer rein zentralen Planung und Steuerung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Potentiale der Einführung von Planungs- und Steuerungsmethoden nach den Lean Management Prinzipien für Bauproduktionsprozesse exemplarisch zu analysieren. Der Fokus liegt auf den baulogistischen Abläufen von Erdbaustellen. Hierzu gilt es zunächst, die generelle Vorteilhaftigkeit der Anwendung von Lean Management im Erdbau theoretisch zu beweisen. Dieser Nachweis bedingt die Kenntnis der momentan vorhanden verborgenen Potentiale für Prozessverbesserungen. Hierzu wurden Analysen durchgeführt, die Auskunft über die bisherigen Prozessabläufe liefern. Basierend auf den Ergebnissen aus existierender Theorie und den beobachteten Praxisbeispielen werden exemplarische Handlungsempfehlungen für die Bauproduktionsplanung und -steuerung abgeleitet.

Obwohl der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem schweren Erdbaustellen liegt, können die gesammelten Erkenntnisse auch auf weitere Bereiche des Bauwesens übertragen werden.

⁶ Und in den Fällen, wo diese Kopplung vorhanden ist, entstehen aufgrund von Informationsverlusten häufig Fehlplanungen und -steuerungen.

1.3 Vorstellung des Forschungsmodells

Ziel dieser Arbeit ist es exemplarisch nachzuweisen, welche Vorteile (Erd-)Baustellen, die eine Bauproduktionsplanung und -steuerung verwenden, die in Einklang mit den Lean Management Prinzipien steht, gegenüber (Erd-)Baustellen haben, die einen traditionellen Ansatz der Bauproduktionsplanung und -steuerung verfolgen.

An dieser Stelle ist kurz zu definieren, was unter „Vorteile“ und „traditioneller Bauproduktionsplanung und -steuerung“ in dem hier dargestellten Zusammenhang zu verstehen ist.

Unter „Vorteile“ sind insbesondere überdurchschnittliche Effektivität und Effizienz innerhalb der Bauproduktion zu verstehen, die dazu führen, dass Bauunternehmen, die Lean Management einsetzen, eine bessere Ausgangslage besitzen, als diejenigen, die einen traditionellen Ansatz verfolgen.

Bzgl. der Unterschiede zwischen einer „leanen“ und einer „traditionellen“ Bauproduktionsplanung und -steuerung wird aufgrund des Umfangs auf die Kapitel 2, 4.3 und 5 verwiesen.

In dieser Arbeit werden insbesondere folgende Forschungsfragen genauer analysiert:

- F1. Welche Wirkungsmechanismen haben die Ansätze „Minimierung von Verschwendung“, „Minimierung von Variabilität“ und das „Pull-Prinzip“ im Bauwesen und was ist bei deren Umsetzung im Spezialfall „Erdbau“ zu berücksichtigen?**
- F2. Wie kann eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien im Erdbau umgesetzt werden?**

Die Definitionen von „Minimierung von Verschwendung“, „Minimierung von Variabilität“ und des „Pull-Prinzips“ sind Kapitel 2 zu entnehmen.

Die aufgestellten Forschungsfragen haben somit zwei Wirkungsebenen. Zum einen die Ebene der Klärung von Wirkungsmechanismen, deren Ziel ein vertiefendes Verständnis der bestehenden Zusammenhänge ist und zum anderen die Ableitung von Handlungsempfehlungen, die in der Praxis umgesetzt werden können. Eine Übersicht des Vorgehens ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

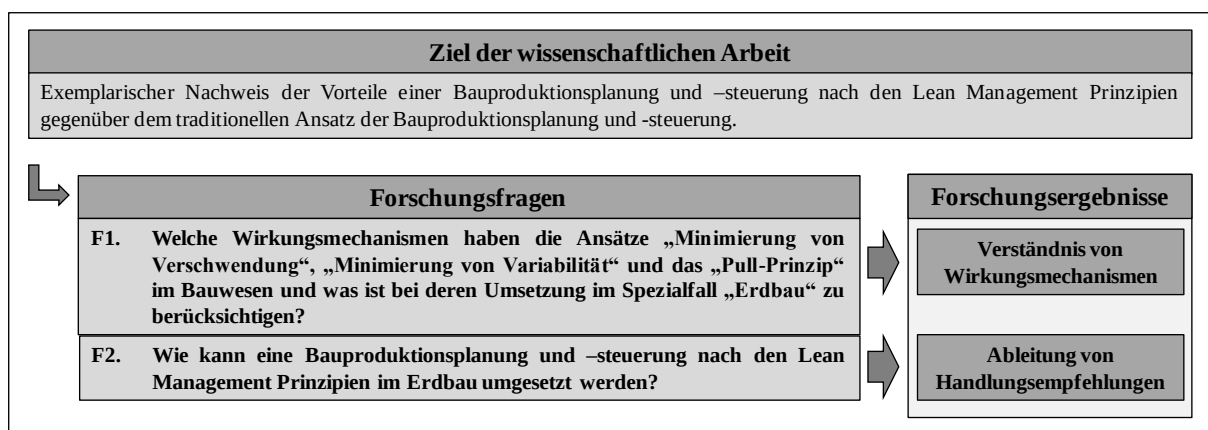


Abbildung 1-2: Darstellung des wissenschaftlichen Vorgehens

1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die Grundlagen aus dem Bereich Lean Management im Bauwesen erläutert. Hierbei wird auf die Historie, Prinzipien, Vorgehensweise und Wirkungsebenen von Lean Management und Lean Management im Bauwesen eingegangen.

In Kapitel 3 wird anhand eines entwickelten generischen Modells erläutert, welche Aufgaben die Bauproduktionsplanung und -steuerung im Spezialfall des schweren Erdbaus hat. Hierbei werden unterschiedliche Punkte des Aufgabenspektrums der Bauproduktionsplanung und -steuerung detaillierter analysiert. Das Modell dient als Ausgangslage für weitere Überlegungen.

Kapitel 4 widmet sich der Beschreibung der momentanen Situation auf Erdbaustellen. Zunächst werden hierzu anhand einer durchgeführten Literaturanalyse die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte erläutert (vgl. Kapitel 4.1). Anschließend werden die Ergebnisse unterschiedlicher vom Autor durchgeführter Fallstudien aufgeführt (vgl. Kapitel 4.2). Des Weiteren wird anhand einer durchgeführten Literaturanalyse dargestellt, welches die wesentlichen Kritikpunkte an der traditionellen Vorgehensweise der Bauproduktionsplanung und -steuerung sind (vgl. Kapitel 4.3). Das Ziel des 4. Kapitels ist, einen exemplarischen Überblick über die in den Produktionsprozessen verborgenen Verbesserungspotentiale zu erhalten.

In Kapitel 5 wird die aufgestellte Forschungsfrage F1 (vgl. Kapitel 1.3) genauer analysiert. Ziel des Kapitels ist es, die Wirkungsmechanismen eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien genauer zu analysieren. Hierzu wird zunächst genau auf die Punkte: Minimierung von Verschwendung, Minimierung von Variabilität und das Pull-Prinzip eingegangen (vgl. Kapitel 5.1). Im Anschluss daran wird erläutert, welche Wirkung eine Prozess- und Flussoptimierung nach den Lean Management Prinzipien hat (vgl. 5.2 und 5.3). Neben der reinen Beschreibung der Wirkungsmechanismen wird in Kapitel 5 darauf eingegangen, was bei einer Umsetzung der einzelnen Punkte zu beachten ist.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Antwort der Forschungsfrage F2 (vgl. Kapitel 1.3). Es wird anhand exemplarischer Beispiele gezeigt, wie Lean Management im Erdbau umgesetzt werden kann und welche Vorteile hiermit verbunden sind (vgl. 6.1). Im anschließenden Kapitel 6.2 wird erläutert, wie eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements ablaufen könnte.

Kapitel 7 widmet sich der kritischen Diskussion der Ergebnisse und weist mögliche zukünftige Forschungsfelder auf.

2 Lean Management im Bauwesen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Lean Management im Bauwesen (LMB) erläutert. Lean Management im Bauwesen ist die Adaption der auf Lean Management basierenden Produktionsparadigmen auf das Bauwesen. Übergeordnetes Ziel ist das Erreichen einer möglichst verschwundungsarmen Wertschöpfung⁷ in der Bauproduktion. Um ein Verständnis von dieser Begrifflichkeit zu bekommen wird in Kapitel 2.1 kurz dargelegt, wie der Begriff „Lean Management“ entstanden ist und was die Hauptprinzipien sind. Die einzelnen Prinzipien werden anschließend in Kapitel 2.2 genauer erläutert. Aus den Prinzipien des Lean Managements sind Handlungsempfehlungen entstanden, die in Form von Regeln formuliert wurden, diese werden in Kapitel 2.3 vorgestellt. Da die Prinzipien und Regeln in einer stark generalisierten Weise formuliert sind und für sämtliche Produktionen anwendbar sind, haben sich im LMB auf das Bauwesen spezialisierte Methoden gebildet, diese werden in Kapitel 2.4. dargestellt. Neben dem Grundverständnis von LMB ist es erforderlich die für diese Arbeit gültige Produktionstheorie zu erläutern. Für diese Arbeit wurde die aus dem LMB stammende Produktionstheorie der „Transformation-Flow-Value Theorie“ gewählt, weshalb diese in Kapitel 2.5 genauer beschrieben wird.

2.1 Historie

Der Begriff Lean Management resultiert aus einer wissenschaftlichen Untersuchung bezüglich der Unterschiede der Entwicklungs- und Produktionsbedingungen international großer Automobilkonzerne. Die Forschungsarbeit wurde durch das Massachusetts Institute of Technology (MIT) geleitet. Aus den Ergebnissen der Forschungsarbeit entstand der internationale Bestseller *„Die zweite Revolution in der Autoindustrie: Konsequenzen aus der weltweiten Studie des Massachusetts Institute of Technology“* (Womack & Jones 2007). Ergebnis der Forschungsarbeit war, dass ein unter der Begrifflichkeit „Lean Production“ (Schlanke Produktion) bekanntes Produktionssystem den übrigen Produktionssystemen in Bezug auf Effizienz und Qualität deutlich überlegen war. Weltweiter Benchmark der „Lean Production“ war zu diesem Zeitpunkt das vom gleichnamigen Unternehmen stammende Toyota Produktionssystem (TPS).

Das TPS ist ein von Toyota entwickeltes Paradigma für die eigene Produktion. Kennzeichnend für das TPS sind die mit ihm in Verbindung stehenden Philosophie (insbesondere: kontinuierliche Verbesserung und Minimierung der Verschwendung) und die zugehörigen entwickelten Methoden zur Umsetzung dieser Philosophie (z.B. Prozesse synchronisieren und stabilisieren, Produktionsnivellierung, visuelles Management, Vermeidung von Fehlern und Training der Prozessbeteiligten)⁸. Die innerhalb des TPS eingesetzten Methoden und Instrumente sind in den meisten Fällen keine völlig neuen Ansätze. Bereits existierende und neue Methoden werden sinnvoll verknüpft, zugehörige Abläufe standardisiert und kontinuierlich an den notwendigen Anpassungen gearbeitet ⁹.

⁷ Zur Definition von Wertschöpfung siehe Kapitel 2.2.3 oder (Koskela 2000), (Womack & Jones 2003), (Ohno 2009) und (Liker 2009).

⁸ Es ist zu erwähnen, dass eine eindeutige Differenzierung zwischen Philosophie und Methode nicht in allen Fällen durchführbar ist. Ein sehr bekanntes Beispiel ist die Just-in-Time Produktion, die im engeren Sinne eine Methode zur prozesssynchronen Bereitstellung ist, aber im weiteren Sinne auch eine Philosophie darstellt.

⁹ vgl. (Ohno 2009) und (Liker 2009).

Durch Verallgemeinerung ist aus dem Begriff „Lean Production“ der Begriff „Lean Management“ entstanden. Lean Management ist somit eine auf den Methoden des TPS basierende Management Philosophie¹⁰.

2.2 Prinzipien

Die Prinzipien des Lean Managements sind grundsätzlich gleichzusetzen mit denjenigen des LMB. Dies ist auf deren Allgemeingültigkeit zurückzuführen. Das wichtigste Prinzip ist das Prinzip der "kontinuierlichen Verbesserung", welches in Kapitel 2.2.1 genauer erläutert wird. Das Ziel der kontinuierlichen Verbesserung ist, die Verschwendungselemente von Prozessen zu minimieren. Um diese identifizieren zu können, ist es zunächst allerdings notwendig, ein Grundverständnis des Begriffs zu erlangen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 2.2.2 dargestellt, was unter "Verschwendung" im Lean Management allgemein verstanden wird. Neben dem generellen Verständnis von Verschwendung ist es notwendig, den Begriff auf den jeweiligen spezifischen Zusammenhang zu projizieren und abzugrenzen, was in dem betrachteten Kontext als Wertschöpfung wahrgenommen wird. Hierzu wird in Kapitel 2.2.3 erläutert was unter "Wertvorstellung" zu verstehen ist.

Insofern existieren drei Prinzipien:

- Kontinuierliche Verbesserung
- Minimierung von Verschwendung
- Kundenorientierte Wertvorstellung

Womack und Jones haben eine hiervon abweichende Darstellung der Prinzipien, sie definieren die fünf Lean Management Prinzipien wie folgt (vgl. (Womack & Jones 2003)):

- Spezifikation des Wertes
- Identifikation des Wertstroms
- Fluss (Flow) des Wertes ohne Unterbrechung
- Ziehen (Pull) des Wertes durch den Kunden
- Streben nach Perfektion

Die Abweichung resultiert daher, dass der Autor den nach Womack und Jones definierten Prinzipien "Spezifikation des Wertes" und "Streben nach Perfektion" eine wesentlich höhere und generelle Geltung zuspricht als den übrigen Punkten. Die übrigen Punkte von Womack und Jones werden vom Autor als Regeln (siehe hierzu weiter unten) verstanden. Die Regeln helfen dabei, sich durch die „Eliminierung von Verschwendung“ dem übergeordneten Ziel der Perfektion anzunähern^{11 12}.

Zur strukturierteren Erläuterung werden drei unterschiedliche Ebenen eingeführt: Prinzipien, Regeln und Methoden. Prinzipien stehen hierarchisch gesehen an oberster Stelle und haben eine universelle Gültigkeit. Aus den Prinzipien lassen sich Regeln ableiten, die durch eine genauere - aber immer noch generelle - Formulierung gekennzeichnet sind. Eine bestimmte Menge an Regeln wird

¹⁰ Womack und Jones haben dies passend in dem Titel des Nachfolgers von „*Die zweite Revolution in der Autoindustrie: Konsequenzen aus der weltweiten Studie des Massachusetts Institute of Technology*“ (Womack & Jones 2007) als „*Lean Thinking*“ ausgedrückt (Womack & Jones 2003).

¹¹ Diese Interpretation wird dadurch gestützt, dass in der einschlägigen Lean Management Literatur der "kontinuierliche Verbesserung" eine besondere Bedeutung zukommt (vgl. z.B. (Imai 1986) und (Spear & Bowen 1999)).

¹² Sacks, Koskela, Dave und Owen schreiben hierzu passend: "As in the TPS, the focus in lean construction is on reduction in waste, increase in value to the customer, and continuous improvement" (Sacks et al. 2010).

kontextspezifisch¹³ interpretiert und in einer Methode - die zur generellen¹⁴ Umsetzung geeignet ist - vereint.

Während Prinzipien und Regeln quasi eine ewige und generelle Gültigkeit haben, werden Methoden stets hinterfragt¹⁵. Diese Abstufung resultiert aus der Detaillierung der Formulierung, Methoden müssen zwangsweise genauer beschrieben werden als Regeln, da sie in einem konkreten Fall adaptiert angewendet werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

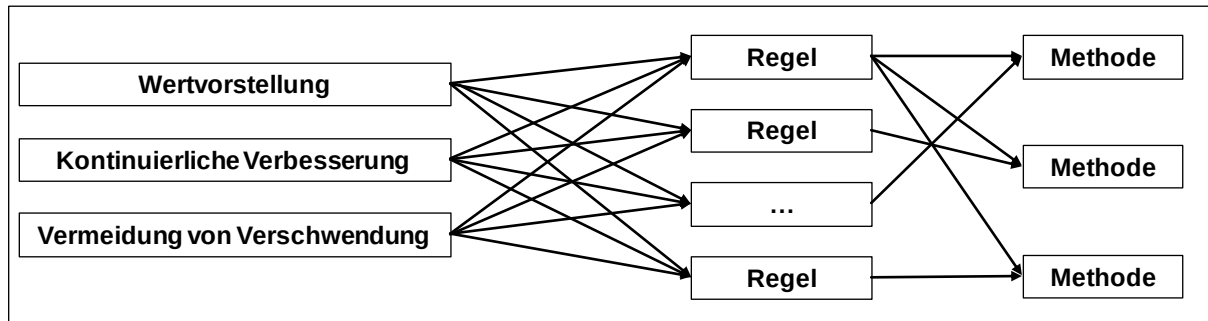


Abbildung 2-1: Die drei Ebenen zur Unterscheidung zwischen Prinzipien, Regeln und Methoden

Verglichen mit einer Autofahrt entspricht das Prinzip der "Wertvorstellung" der Richtungsanweisung, "kontinuierliche Verbesserung" der Antriebskraft - inklusive der zugehörigen Regulierung - und "Vermeidung von Verschwendung" den Lenkbewegungen. Hieraus folgt, dass die drei Prinzipien unterschiedliche Wirkungsebenen besitzen (Zielkoordinaten, Geschwindigkeit und Kurssteuerung). Dennoch hängen die drei Prinzipien untrennbar zusammen, da z.B. die Lenkbewegungen von der Geschwindigkeit und der Wahl der Zielkoordinaten abhängt. Nur wenn alle drei "Prinzipien" gleichzeitig umgesetzt werden, ist die „Autofahrt“ möglich.

Aus diesem Grund besitzen Prinzipien eine $3:n$ Beziehung mit Regeln. Methoden können wiederum auf unterschiedlichen Regeln basieren und haben aus diesem Grund eine $n:m$ Beziehung mit Regeln (vgl. Abbildung 2-1).

2.2.1 Kontinuierliche Verbesserung

Wie bereits erwähnt, ist die kontinuierliche Verbesserung (auch "kontinuierlicher Verbesserungsprozess" (KVP) oder "Kaizen" genannt) eines der Prinzipien des Lean Managements. KVP ist sozusagen das "Perpetuum mobile", das Lean Management und die hiermit verbunden Regeln und Methoden "in Bewegung" hält. Das Ziel ist, Perfektion zu erreichen, jedoch mit dem Wissen dieses Ziel nie erreichen zu können. Zur Annäherung an das Ziel der Perfektion dient eine Kombination aus Innovation und kontinuierlicher inkrementelle Verbesserung. Obwohl das Management von Innovationen ein wesentlicher Bestandteil in diesem Prozess ist, wird hierauf nicht weiter eingegangen, da der wesentliche philosophische Unterschied von Lean Management gegenüber anderen Managementphilosophien die kontinuierliche inkrementelle Verbesserung ist. Des Weiteren ist eine klare Abgrenzung kaum möglich, weswegen unter KVP beide Begrifflichkeiten zu verstehen sind.

¹³ kontextspezifisch im Sinne einer Domäne z.B. die Domäne Maschinenbau, Bauwesen usw..

¹⁴ generell in Bezug auf die jeweilige Domäne, z.B. zur generellen Umsetzung im Bauwesen. Da Sachverhalte nicht nur domänenspezifisch sondern auch projektspezifisch sind, muss eine Methode des Weiteren auf das jeweilige Projekt angepasst werden.

¹⁵ vgl. hierzu (Spear & Bowen 1999).

Eine Darstellung der Wirkungslogik von kontinuierlicher Produktionsverbesserung ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Kern ist der PDCA-Zyklus, der durch die Phasen: Plan (P), Do (D), Act (A) und Check (C) gekennzeichnet ist (vgl. (Fischermanns 2006) (Imai 1997) und (Imai 1986)). Die Produktionsqualität steigt mit jeder Eliminierung von Verschwendung. Sobald ein Zyklus durchlaufen ist, sichert Standardisierung den Prozess gegen einen Rückfall in den alten Systemstatus ab. Das unermüdliche Suchen nach dem Optimum (im Bild dargestellt durch „Kontinuierliche Verbesserung“) ist quasi der Motivator für jegliche Anstrengungen im Bereich Lean Management.

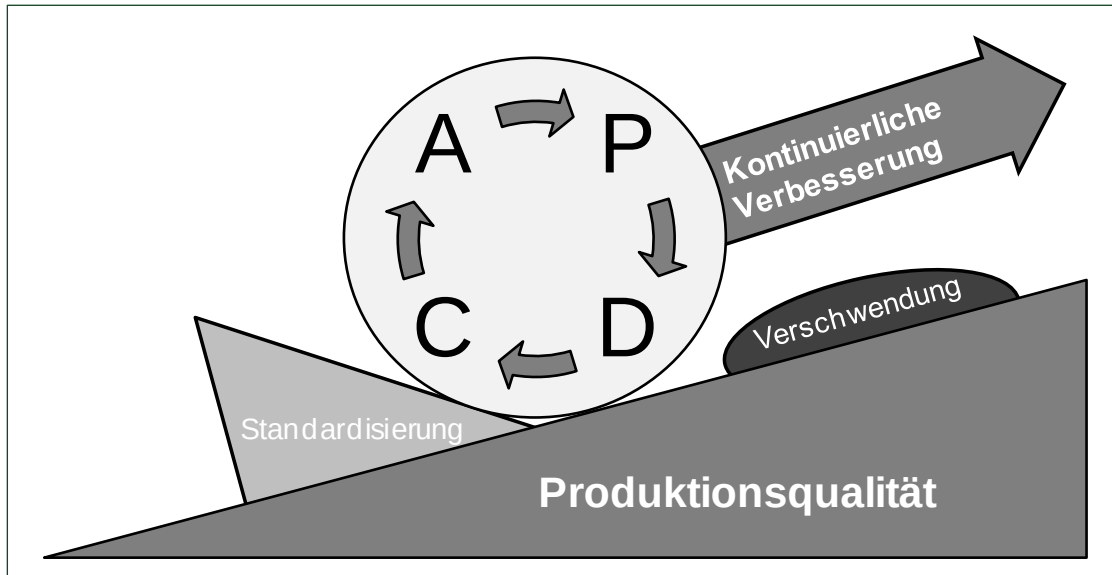


Abbildung 2-2: Wirkungslogik kontinuierlicher Produktionsverbesserung (vgl. (Erlach 2007))

Nach Dickmann erfolgt kontinuierliche Verbesserung in den Schritten (vgl. (Dickmann 2009)):

- Gehe an den Ort der Wertschöpfung
- Beobachte das Geschehen
- Suche nach Verschwendung
- Eliminiere die Verschwendung durch kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen

Rother und Shook unterscheiden außerdem zwischen kontinuierlichen Verbesserungsmaßnahmen, die den gesamten Wertstrom (sog. Fluss-Kaizen) und denen, die nur einen bestimmten Ausschnitt (sog. Prozess-Kaizen) berücksichtigen. Dieser Sichtweise liegt zu Grunde, dass es bestimmte Bereiche von Verbesserungspotentialen gibt, die man nur aus einer Position erkennen kann, die eine Übersicht über den Gesamtprozess zulässt und weitere, die man nur aus einer detaillierteren Sichtweise erkennen kann. Man kann sich diese Unterscheidung z.B. anhand der Ebene des Topmanagements¹⁶ und der Shopfloor-Ebene¹⁷ veranschaulichen. Beide Arten stehen in einer gewissen Abhängigkeit. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-3 dargestellt (vgl. (Rother & Shook 2004)).

¹⁶ Die Ebene des Topmanagement wird gegenüber der Shopfloor-Ebene (vgl. Fußnote 17) dadurch abgegrenzt, dass sie für den Gesamtablauf verantwortlich ist (d.h. die Aufgabe des Topmanagements ist es die existierenden Schnittstellen so zu „managen“, dass ein möglichst effizienter und effektiver Ablauf der Geschäftsprozesse möglich ist).

¹⁷ Als Shopfloor wird der Bereich eines Unternehmens bezeichnet, in der die Produktion stattfindet (d.h. der Ort an dem die eigentliche Wertschöpfung stattfindet) (vgl. (Illing 2013)).

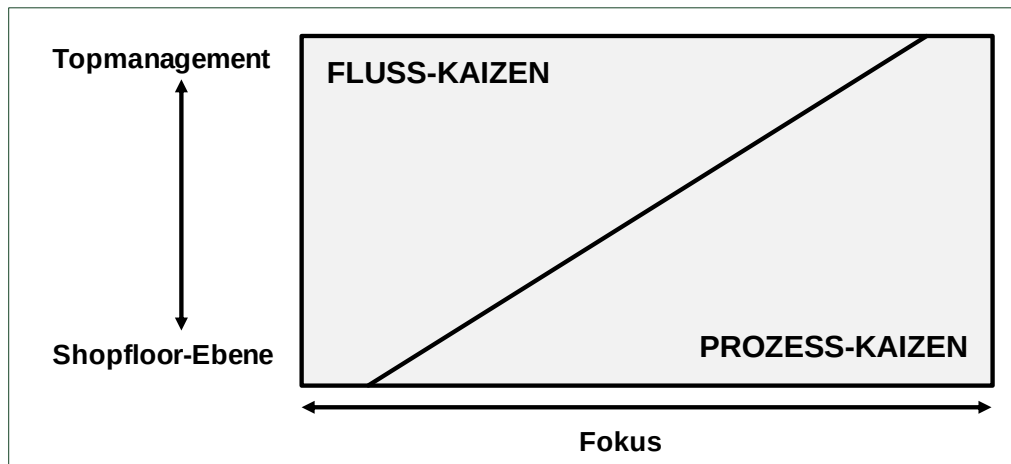


Abbildung 2-3: Die Unterscheidung der kontinuierlichen Verbesserung in zwei Ebenen (Rother & Shook 2004)

Diese Unterteilung ist analog in der von Koskela entwickelten Transformation-Flow-Value-Theorie enthalten (vgl. (Koskela 2000)).

Eine ausführlichere theoretische Adaptierung der kontinuierlichen Verbesserung auf das Bauwesen ist in (Gehbauer & Kirsch 2006) und (Kirsch 2008) dargestellt.

Obwohl der Ansatz von kontinuierlicher Verbesserung auf alle Unternehmenssektoren¹⁸ angewendet werden kann (vgl. (Imai 1997)), wird im Zusammenhang dieser Arbeit der Fokus auf die Produktion gelegt. Im Bauwesen ist dies die Baustelle, der Ort an dem sich letztlich entscheidet, ob ein gutes oder schlechtes Produkt - sowohl aus qualitativer als auch aus ökonomischer Sicht - entsteht¹⁹.

2.2.2 Definition von Verschwendung

Ein wesentlicher Punkt innerhalb von Lean Management ist das Verständnis von Wertschöpfung und Verschwendung. Grundsätzlich lassen sich Tätigkeiten hierzu in drei Kategorien einteilen: Tätigkeiten die zur Wertsteigerung eines Produkts beitragen (sog. wertschöpfende Tätigkeiten), Tätigkeiten die nicht zur Wertsteigerung beitragen aber - bezogen auf einen Prozessablauf - notwendig sind und Tätigkeiten die nicht zur Wertschöpfung beitragen und nicht notwendig sind (vgl. (Ohno 2009)).

Bezüglich der genaueren Semantik von Wertschöpfung wird auf Kapitel 2.2.3 verwiesen, die Bedeutung des Begriffs „Verschwendung“ wird im Folgenden erläutert²⁰.

Ohno unterteilt den Begriff Verschwendung in die sieben Unterkategorien (vgl. (Ohno 2009)) :

- **Überproduktion:**
Produktion von vom Kunden nicht gewollten Gegenständen oder Dienstleistungen
- **Warten:**
Wartezeit, die zwischen Prozessen entsteht
- **Transport:**
Transporte zwischen Prozessen

¹⁸ Hierunter fallen z.B. Finanzmanagement, Produktion, Marketing, Verkauf und Produktentwicklung.

¹⁹ Ein Beispiel für die Anwendung im Bauwesen ist (Ikuma et al. 2011).

²⁰ Eine gute Erläuterung bzgl. Verschwendung ist auch in (Imai 1997) zu finden. Eine spezifischer auf das Bauwesen angepasste Erläuterung befindet sich in (Frey 2011).

- Zu starke Bearbeitung (Überarbeitung)
Überflüssige Prozesse, die nicht zur Wertsteigerung des Endprodukts beitragen
- Lagerbestand:
Unnötige Lagerbestände, die Kapital binden, Flächen belegen oder bei zu großer Lagerdauer nicht weiter verwendet werden können.
- Bewegungen:
Neben dem reinen Transport sind hierunter alle weiteren Bewegungsarten zu verstehen (z.B. Handgriffe, Bückbewegungen etc.)
- Herstellung defekter Teile und Produkte:
Defekte Teile müssen erneut bearbeitet werden oder müssen im schlimmsten Fall direkt entsorgt werden.

Diese Einteilung ist auch unter dem Begriff die „7M“ oder „muda“ bekannt. Man erkennt deutlich, dass eine scharfe Abgrenzung der Verschwendungsarten nahezu unmöglich ist, da beispielsweise „Transporte“ auch eine Bewegung darstellen. Es ist allerdings auch nicht das Ziel, eine hundertprozentige Abgrenzung zu erreichen, sondern ein Verständnis für die Natur von Verschwendung zu bekommen, was wiederum zur Identifikation dieser beiträgt.

Liker und Ohno beschreiben zwei weitere Verschwendungen die innerhalb des TPS adressiert sind, nämlich (vgl. (Liker 2009) und (Ohno 2009)):

- Überlastung von Menschen oder Maschinen:
Menschen oder Maschinen über die natürlichen Grenzen zu beanspruchen
- Ungleichgewicht:
Schwankende Auslastungsgrade

Die „Überlastung von Mensch und Maschine“ ist auch unter dem Begriff „muri“ und „Ungleichgewicht“ unter „mura“ geläufig (vgl. (Liker 2009), (Ohno 2009) und (Imai 1997)). Während relativ uninteressant ist, unter welcher Begrifflichkeit der jeweilige Sachverhalt fällt, ist ihre gegenseitig Beeinflussung von erheblicher Bedeutung. Diese sog. „3Ms“ (muda, muri und mura) stehen in einer gewissen Abhängigkeit, wie schon von Liker dargestellt (vgl. Abbildung 2-4), und werden später Ausgangspunkt für eine vertiefende Untersuchung bzgl. des Zusammenhangs bilden, um ein besseres Verständnis von Lean Management zu bekommen (vgl. Kapitel 5.1).

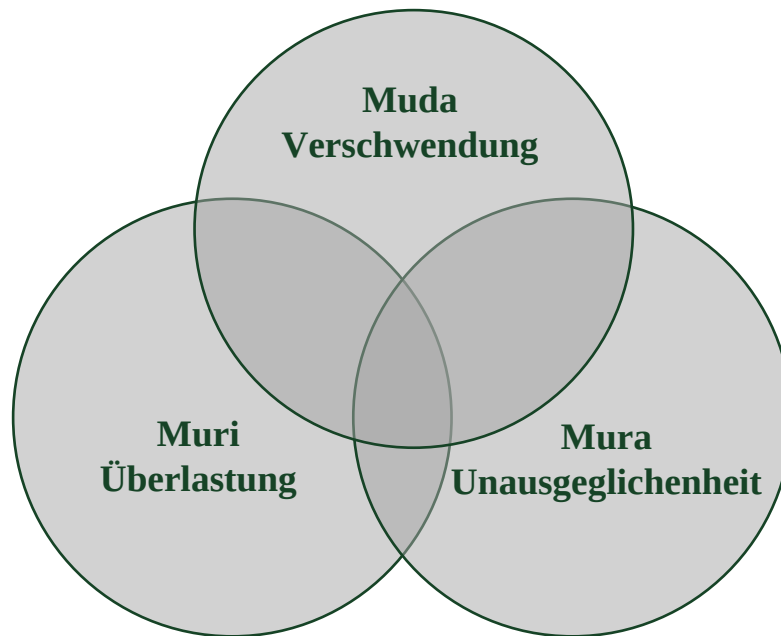


Abbildung 2-4: Die drei „Ms“ (Liker 2009)

2.2.3 Wertvorstellung

Was werthaltig ist und was nicht, wird durch den jeweiligen Kunden definiert (vgl. (Koskela 2000)). Produkte und insbesondere auch die Produkte des Bauwesens werden letztlich für einen Kunden hergestellt. Je nach Struktur der Produktion - die in Abhängigkeit vom herzustellenden Gut ausgewählt wird - ist der Kunde stärker oder schwächer bei der Produktdefinition eingebunden²¹.

Das Begriffsverständnis von Wertschöpfung ist sehr divers und individuell. Wertschöpfung abgeleitet aus der Theorie der Transformation (vgl. Kapitel 2.5) bedeutet letztlich Produktivität. Dieses Verständnis von Wertschöpfung ist allerdings nicht zielführend, da fertiggestellte Produkte an sich „keinen“ Wert darstellen. Erst wenn die Produkte zu dem jeweilig realisierbaren Marktpreis verkauft wurden, haben sie einen bestimmten Wert in Form des Geldbetrags, der vom Kunden bezahlt wird. Der bezahlte Geldbetrag ist allerdings wiederum nur ein unscharfer Indikator für die Wertvorstellung des Kunden, da der Kunde z.B. bei einem Angebotsmangel eine suboptimale Lösung akzeptiert, allerdings grundsätzlich bereit dazu wäre, mehr Geld für eine Leistung zu bezahlen, die besser seinen Bedürfnissen entspricht.

Das Verständnis des Begriffs Wertschöpfung in der Flusstheorie (vgl. 2.5) ist, dass Wertschöpfung nur dort entsteht, wo ein Abnehmer bzw. Kunde existiert und bereit ist für das Produkt einen bestimmten Geldbetrag²² zu bezahlen, der höher ist als die mit der Produktherstellung zusammenhängenden Kosten. Dieser Kunde existiert wiederum nur dann, wenn das erstellte Produkt dessen Bedürfnisse erfüllt (in Bezug auf Lieferzeit, Liefermenge, Qualität, usw.).

Da der Wert eines Produkts durch die Bereitschaft eines Kunden einen Geldbetrag dafür zu bezahlen definiert wird, ist dieser - wie bereits angedeutet - gleichzeitig von der jeweiligen Marktsituation

²¹ Man vergleiche im Extremfall die Herstellung eines Masseguts (z.B. Schokoladenriegel) mit einer individuellen Einzelanfertigung (z.B. Einkaufszentrum).

²² Man könnte alternativ auch sagen, dass nur dort Wertschöpfung entsteht, wo ein Kunde für das Produkt existiert, der das Produkt wertschätzt. Da heute allerdings überwiegend Geld als Zahlungsmittel fungiert und der Kunde mit Geld am Marktgeschehen teilnimmt, wurde diese Formulierung gewählt.

(insbesondere Angebot, Nachfrage und Kaufkraft) abhängig (vgl. (Salvatierra-Garrido & Pasquire 2011)).

Ein wesentliches Anliegen des Lean Managements ist Wertschöpfung aus Sicht des Kunden²³ zu definieren. Im Bauwesen ist der Kunde grundsätzlich sehr stark bei der Produktdefinition eingebunden. Dennoch wird es häufig versäumt die Wertvorstellungen des Kunden während der Planung im Bauwesen in ausreichendem Umfang zu berücksichtigen. Dies geschieht zum einen, weil der Kunde häufig selbst unsicher bezüglich seiner Wertvorstellung ist, was wiederum meist darauf zurückgeführt werden kann, dass der Kunde kein Fachmann für Bauen ist und somit erhebliche Vorstellungsschwierigkeiten hat. Zum anderen allerdings auch, weil der Kunde nur unzureichend in die Planung involviert wird und nicht in vollem Umfang über die Vor- und Nachteile eines bestimmten Sachverhaltes aufgeklärt wird.

Die Wertvorstellung ist momentan einer sehr individuellen Definition unterworfen. Trotz Bemühungen um ein einheitliches Verständnis in diesem Bereich, ist dieses Ziel bisher nicht erreicht worden (vgl. (Salvatierra-Garrido & Pasquire 2011)). Insofern gilt die in dieser Arbeit aufgeführte Erläuterung von Wertvorstellung insbesondere für die hier vorgestellten Zusammenhänge.

2.3 Regelsätze

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, resultieren Regeln aus bestimmten Prinzipien. Regeln verkörpern generalisierte Vorgehensweisen bei der Umsetzung eines Lean Management Prinzips. Regeln sind weiterhin so generalisiert formuliert, dass sie in unterschiedlichen Industrien identisch angewendet werden können.

Die wesentlichen Regeln des Lean Managements werden im Folgenden erläutert²⁴.

Verringerung der Variabilität

Variabilität bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Dimensionen Qualität und Zeit. Qualitätsunterschiede in der Produktion führen zu Nacharbeit oder Ausschuss. Variabilität von Prozesszeiten wiederum ist die Ursache von geringen Auslastungen, hohen Puffern, gegenseitigem Blockieren der Prozesse usw. (vgl. (Hopp & Spearman 2011), (Arnold & Furmans 2009) und (Günther & Tempelmeier 2009)). Die Variabilität von Qualität und Variabilität von Prozesszeiten stehen in einer gewissen Abhängigkeit zueinander²⁵.

Verringerung von Zykluszeiten

Die Zykluszeiten ist diejenige Zeit, die ein Prozess benötigt um die vorgegeben Arbeitsinhalte an einer Einheit zu verrichten. Zykluszeiten, die länger als notwendig sind, beinhalten Tätigkeiten die überflüssig sind und stellen somit eine Verschwendung dar (vgl. (Rother & Harris 2006)). Während die Verringerung der Variabilität die Standardabweichung der Zykluszeiten²⁶ betrifft, bezieht sich dies Aussage insbesondere auf die Reduktion der Erwartungswerte der Zykluszeiten. Kürzere Zykluszeiten

²³ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Kunde meist nicht nur durch eine Einzelperson, sondern durch einen Personenverbund repräsentiert wird (z.B. Bauherr, Nachbarn, Behörden, Bank usw.) (vgl. (Vrijhoef & Koskela 2005) und (Salvatierra-Garrido & Pasquire 2011)).

²⁴ Die Aufzählung der Regeln orientiert sich an den von Sacks et al. aufgelisteten Prinzipien des Lean Constructions (vgl. (Sacks et al. 2010)).

²⁵ z.B. wird ein fehlerhaftes Produkt produziert (schlechte Qualität), sind längere Prozesszeiten zur Korrektur notwendig.

²⁶ In dem hier verwendeten Kontext beinhalten Zykluszeiten Verschwendungselemente wie: Wartezeiten, unnötige Transportzeiten, unnötige Bewegungen usw.

verringern die Durchlaufzeit und sind gleichzeitig eine Voraussetzung für geringere Losgrößen (vgl. hierzu weiter unten).

Verringerung der Losgrößen

Unter einer Losgröße ist die Menge an zu produzierenden Produkten innerhalb eines Fertigungsauftrags - der wiederum für einen bestimmten Produktionsabschnitts gültig ist - zu verstehen (vgl. (Hopp & Spearman 2011), (Schuh & Roesgen 2006) und (Arndt 2008)). Die Verringerung von Losgrößen hat zur Folge, dass kürzere Steuerungszyklen entstehen und dass die aus dem Bedarf resultierende Taktgebung direkteren Einfluss auf den betrachteten Produktionsprozess hat (vgl. (Ohno 2009)). Im Bauwesen ist eine Losgröße z.B. ein definierter Abschnitt eines Bauwerks.

Steigerung der Flexibilität

Flexibilität kann bei Planabweichungen oder kurzfristigen -änderungen dazu genutzt werden negative Konsequenzen für die Produktion zu verringern. Somit ist gerade in dynamischen Prozessen Flexibilität erforderlich. Planabweichungen oder kurzfristige -änderungen werden in der Regel durch unterschiedliche Pufferarten abgefangen (z.B. Zeitpuffer, Kapazitätspuffer, hohe Qualifikation des Personals und fertige Zwischenprodukte (vgl. (Hamzeh et al. 2008))). In einer Umgebung, die sich nicht verändert, kann auf Flexibilität verzichtet werden. Da die Bauproduktion in einem dynamischen Umfeld stattfindet, spielt gerade hier Flexibilität eine erhebliche Rolle (vgl. (Miranda Filho et al. 2012)).

Auswahl einer geeigneten Methode der Produktionssteuerung

Im Wesentlichen unterscheidet man zwischen zwei Varianten der Prozesskopplung. Dem sog. "Pull-System" und dem sog. "Push-System". Pull-Systeme sorgen dafür, dass ein Lieferantenprozess in Abhängigkeit des Bedarfs eines Kundenprozesses produziert (d.h. kurze und direkte Steuerungszyklen)²⁷. Dem gegenüber sind Push-Systeme dadurch gekennzeichnet, dass der Kundenbedarf nur langfristig bei der Produktion des Lieferantenprozesses eine Rolle spielt (d.h. längere und häufig indirekte Steuerungszyklen) (vgl. (Formoso & Isatto 2009)). Im Lean Management ist grundsätzlich das Pull-System vorzuziehen, kann aber nicht in allen Fällen umgesetzt werden (vgl. (Smalley 2005) und (Erlach 2007)). Die Folge der Push-Produktion sind große Puffer in Form von Zwischenprodukten, gegenseitige Blockierung und hoher Ausschuss.

Standardisierung

Standardisierung hat im Zusammenhang mit kontinuierlicher Verbesserung (vgl. Kapitel 2.2.1) den Zweck, dass aufgrund von Gewohnheiten nach einer Verbesserungsmaßnahme nicht erneut der alte Systemzustand eintritt. Des Weiteren ist Standardisierung eine Möglichkeit, um Prozesszeiten und -variabilität zu verringern (vgl. (Liker 2009), (Erlach 2007), (Dickmann 2009) und (Imai 1997)).

Verbindlichkeit zur Aufrechterhaltung des Gedankens der kontinuierlichen Verbesserung

Nur wenn eine Organisation das gemeinsame Ziel der Perfektion vor Augen hat und Prozesse ständig neu hinterfragt, wird kontinuierliche Verbesserung im Sinne von Kaizen gelebt. Hierzu sind entsprechend notwendige Maßnahmen (z.B. Fortbildungen, „Lessons Learned“, Honorierung) erforderlich, die ein Ermüden oder gar ein Erliegen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses vermeiden.

²⁷ vgl. (Liker 2009), (Koether 2008), (Günther & Tempelmeier 2009) und (Dickmann 2009).

Die Nutzung von visuellem Management

Hierunter ist die Nutzung einer visuellen Darstellung zum Informationstransfer zu verstehen. Während Geschriebenes häufig missverständlich ist - insbesondere auch aufgrund von Sprachschwierigkeiten oder kulturellem Hintergrund - ist eine Visualisierung häufig eindeutig und unmissverständlich (vgl. (Ohno 2009), (Liker 2009) und (Imai 1997)).

Identifikation des Wertstroms

Diese Regel dient dazu, die Orte der Wertgenerierung zu identifizieren. Ein beliebtes Mittel ist das Aufzeichnen der an der Wertschöpfung direkt beteiligten Produktionsprozesse (es handelt sich hierbei um einen der ersten Schritte der Wertstromanalyse (vgl. (Rother & Shook 2004) und (Erlach 2007))). Die Identifikation des Wertstroms dient als Ausgangslage für Verbesserungsmaßnahmen jeglicher Art²⁸.

Verringerung der Durchlaufzeiten

Die Durchlaufzeit bezieht sich auf einen oder mehrere Produktionsprozesse und misst die Zeit, die ein Produkt von Bestellungseingang bis Auslieferung benötigt (vgl. (Rother & Shook 2004)). Die Verringerung der Durchlaufzeiten steht in engem Zusammenhang mit der Verringerung von Variabilität, Zykluszeiten und Losgrößen. Eine kürzere Durchlaufzeit ist des Weiteren gleichzusetzen mit geringen Materialbeständen²⁹. Die Vorteile einer geringeren Durchlaufzeit sind insbesondere ein größerer Kapitalumschlag, die Minimierung von Ausschuss und das Schaffen von Prozesstransparenz. Eine kurze Durchlaufzeit ist zudem der Voraussetzung für die Umsetzung eines Pull-Systems, das über Systemgrenzen hinweggeht (im Sinne eines Supply Chain Managements).

Etablierung einer Fließproduktion

Der Begriff Fließproduktion beinhaltet die Forderung, dass die einzelnen Arbeitssysteme (Stationen) - wo immer dies möglich ist - so angeordnet werden, dass ein sequenzieller "fließender" Produktionsprozess mit minimalen Puffern (in Form von Zwischenprodukten, Zeit und Kapazität) entsteht (vgl. (Rother & Harris 2006)). Jeder Station wird eine bestimmte Menge von Bearbeitungsoperationen zugeordnet, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne (der sog. Taktzeit) zu erledigen sind (vgl. (Günther & Tempelmeier 2009), (Smalley 2005)). Ziel der Fließproduktion ist, dass die Arbeitsobjekte die Produktion mit minimalem Widerstand (in Form von Zeit und Aufwand) durchlaufen. Im Bauwesen ist hier ein erheblicher Unterschied zur stationären Industrie festzustellen, da aufgrund der Dimension der Arbeitsobjekte nicht diese die Produktion durchlaufen, sondern die Arbeitsstationen der Produktion das Arbeitsobjekt durchlaufen (vgl. (Koskela 2000)). Fließproduktion hängt sehr eng mit den Regeln Verringerung der Durchlaufzeiten, Identifikation des Wertstroms, Standardisierung, Verringerung der Losgrößen, Verringerung der Variabilität, Steigerung der Flexibilität und Pull-Steuerung zusammen (vgl. (Dickmann 2009)).

Systematische Erfassung der Kundenanforderungen

Werden Kundenwünsche nicht systematisch erfasst, entstehen im weiteren Verlauf der Produktion vermeidbare Änderungswünsche, die eine Quelle für Folgeprobleme wie z.B. Variabilität,

²⁸ Ohno schreibt hierzu passend: "Die Verbesserung der Effizienz macht nur Sinn, wenn sie mit Kostensenkung verbunden ist. Um diese zu erreichen, müssen wir beginnen, nur Dinge herzustellen, die wir tatsächlich benötigen, bei Einsatz einer Mindestanzahl von Arbeitskräften" (Ohno 2009). Damit dies möglich ist, müssen zuvor die Dinge identifiziert werden, die tatsächlich benötigt werden. Dies ist das Thema der "Identifikation des Wertstroms".

²⁹ Dies ist eine direkte Konsequenz aus „Littles Gesetz“ (vgl. (Arnold & Furmans 2009)). Die mittlere Anzahl der in einem System befindlichen Aufträge ergibt sich aus der Multiplikation der mittleren Verweilzeit der Aufträge im System und der Ankunftsrate der Aufträge (Erwartungswert der eingehenden Aufträge pro Zeiteinheit). Wird die Verweilzeit (welche der Durchlaufzeit entspricht) verringert, verringern sich auch die Anzahl der Aufträge im System und damit auch die Bestände.

Qualitätsmängel, Rechtsstreitigkeiten, Terminüberschreitungen usw. darstellen. Kundenwünsche müssen aus diesem Grund möglichst frühzeitig und umfassend berücksichtigt werden (vgl. (Koskela 2000)). Gleichzeitig ist es erforderlich dem Kunden die Konsequenzen seiner Wünsche deutlich zu machen und sicher zu stellen, dass keine Missverständnisse entstehen.

Wahl einer geeigneten Detaillierung der Planung

Die Planung sollte in einem frühen Projektstadium nie genauer als notwendig erfolgen, um die Flexibilität der Planung aufrecht zu erhalten. Die Tendenz zu früh zu detailliert zu planen hat zur Folge, dass Alternativen ausgeblendet werden, oder dass, falls diese im weiteren Verlauf erkannt und gewählt werden, unnötige Vorarbeiten geleistet wurden. Gleichzeitig gilt es zu verhindern, dass zu späte und zu ungenaue Planung dazu führt, dass weitere Prozesse durch diese aufgehalten werden. Es gilt das Optimum für die jeweilige Situation zu finden (vgl. (Laufer 1991)).

Sicherstellung der Verbreitung von Anforderungen

Sind die Anforderung gemeinsam mit dem Kunden festgelegt worden, muss dafür gesorgt werden, dass diese auch auf allen Ebenen der Produktion ankommen und verstanden werden (vgl. (Koskela 2000)). Nur wenn alle Ebenen eine einheitliche Vorstellung von den Anforderungen haben ist es möglich, dass Wertschöpfung im Sinne des Kunden erfolgt.

Umfassende Verifizierung und Validierung

Dieser Punkt beinhaltet eine stete Überprüfung der vermuteten oder behaupteten Sachverhalte. Hierbei ist zu prüfen, ob die festgelegten Forderungen erfüllt wurden (Verifikation) und ob eine neutrale Beurteilung der Sachverhalte zu identischen Ergebnissen führt (Validierung). Ziel ist Sachverhalte genauer zu analysieren und nur fundierte Ergebnisse für den weiteren Verlauf zu verwenden (vgl. (Liker 2009) und (Spear & Bowen 1999)).

Bildung einer eigenen Einschätzung von Sachverhalten durch persönliche Besichtigungen

Die Produktionsplanung und -steuerung basiert auf einer Fülle an Daten. Generell kann zwischen zwei Datentypen unterschieden werden, Daten, die aus einer Primärerhebung oder solche, die aus Sekundärerhebung resultieren. Die Primärerhebung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Daten eigens für die geplante Untersuchung ermittelt wurden. Dem gegenüber werden bei der Verwendung von Daten aus Sekundärerhebungen Daten ausgewertet, die für andere Zielsetzungen erhoben wurden (vgl. (Arnold & Furmans 2009)). Hierbei gilt generell, dass Daten aus einer Primärerhebung geeigneter sind, um einen Sachverhalt zu untersuchen, allerdings ist der Aufwand entsprechend größer. Der Wissensverlust durch Berichte oder Beschreibungen ist so erheblich, dass nur eine persönliche Meinungsbildung vor Ort wirklich geeignet ist, um Entscheidungen fundiert treffen zu können (vgl. (Liker 2009) und (Imai 1997)).

Entscheidungen im Konsens mit den betroffenen Projektbeteiligten treffen

Durch die Ausweitung des Personenkreises der Entscheidungsträger wird eine breitere Wissensbasis zugänglich. Durch die Vergrößerung des Wissenspools steigt die Wahrscheinlichkeit unter unterschiedlichen Optionen die beste Variante zu identifizieren. Gleichzeitig ist der Widerstand bei der Umsetzung der gemeinsam getroffenen Entscheidungen deutlich geringer. Damit dies möglich ist, müssen zunächst alle relevanten Personen Zugang zu den für die Entscheidung notwendigen Informationen haben und anschließend real an den Entscheidungen beteiligt werden. Dies bedingt eine Unternehmensorganisation bzw. Projektorganisation, die agile und netzwerkartige Strukturen zur Kommunikation zulässt (vgl. (Kotter 2012)).

Etablierung einer partnerschaftlichen Umgebung

Dieser Punkt verdeutlicht, dass alle Projektpartner in einem "Boot" sitzen. Jeder kann das "Leben" des anderen erschweren oder erleichtern (vgl. (Girmscheid 2005)). Generell ist es besser, partnerschaftlich miteinander umzugehen und die Interessen und Meinungen des anderen zu respektieren. Trotz teilweise vorhandener stark divergierender Standpunkte, muss partnerschaftlich nach einer Lösung gesucht werden. Wenn jeder Projektpartner nur seine eigenen Interessen vertritt und nicht im Sinne des Gesamtprojekts (und damit auch auf Kosten anderer Projektbeteiligter) handelt (z.B. durch gezieltes Unterlassen von Informationsbereitstellung und Kommunikation), werden - verborgene - Chancen und Risiken nicht erkannt und/oder die hierin verborgenen Potentiale unzugänglich (vgl. (Harrant & Hemmrich 2004)).

2.4 Wirkungsebenen und Methoden von Lean Management im Bauwesens

Innerhalb von LMB haben sich einige Methoden etabliert, die die Umsetzung von Lean Management in der Domäne „Bauwesen“ unterstützen. Es haben sich hierbei drei Wirkungsebenen der Methoden ergeben, diese sind:

- "Commercial terms"
Unter dem englischen Begriff "commercial terms" sind im weiteren Sinne die etablierten Handelsbedingungen zu verstehen. Insbesondere fallen hierunter die durch das Vertragswesen festgelegten Bedingungen der Zusammenarbeit. Ein wesentliches Ziel ist es die Verantwortlichkeiten und Gewinne, die sich aus der Geschäftsbeziehung ergeben, fair und transparent zu verteilen.
- "Organization"
Die Semantik von "Organization" ist in diesem Zusammenhang gleichzusetzen mit dem deutschen Begriff "Organisation". Demnach ist hierunter die Aufbau- und Ablauforganisation zu verstehen.
- "Operating System"
Diese Ebene betrifft die Methoden, die die Ausführung von Arbeitsabläufen steuern.

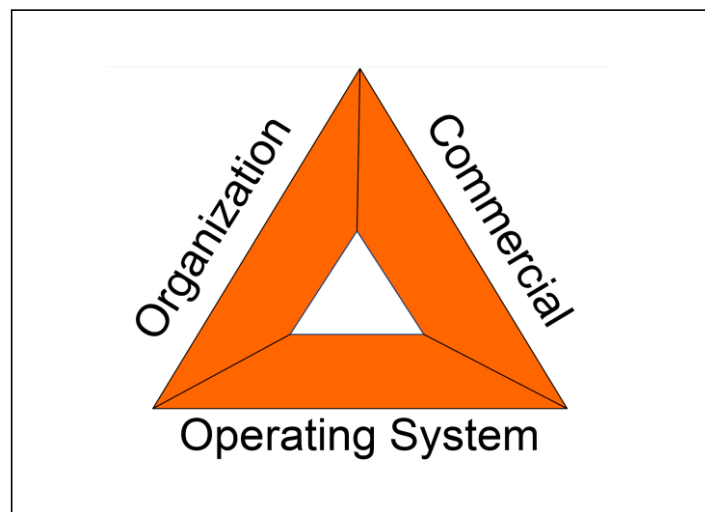


Abbildung 2-5: Wirkungsebenen von Lean Management im Bauwesen (Lichtig & Kievet 2012)

Bezüglich des relevanten Zeithorizonts lassen sich die Methoden weiter unterteilen in Methoden, die auf strategischer oder operativer Ebene einsetzbar sind.

Alle Methoden sind als Leitfaden zur Umsetzung einer kontinuierlichen Verbesserung zu verstehen.

Wichtig ist zu erwähnen, dass es sich bei vielen Methoden nicht nur um aus dem Lean Management bekannte Methoden handelt. So sind beispielsweise Ordnung und Sauberkeit oder die Wurzelfehleranalyse (siehe hierzu weiter unten) auch aus anderen Bereichen sehr bekannt, neu ist allerdings mit welcher Konsequenz und mit welcher ganzheitlichen Ausrichtung diese Methoden angewendet werden.

Entsprechend der ursprünglichen Gesinnung von Toyota sind diese Methoden nur solange gültig, bis bessere, an die jeweilige spezifische Umgebung angepasste Methoden identifiziert werden. Allein die Prinzipien verlieren nicht an Gültigkeit. Die Methoden sind temporär gültige "Best-Practises", die dabei helfen die Lean Management Prinzipien umzusetzen³⁰.

Die Kategorisierung der Wirkungsebenen ist im Zusammenhang mit dem aus LMB stammenden Ansatz der integrierten Projektabwicklung im Bauwesen entstanden, dem Ansatz der sog. „Integrated Project Delivery“ (IPD) (vgl. (Thomsen et al. 2010)). IPD ist hauptsächlich ein ganzheitliches relationales Vertragswerk³¹, das die Umsetzung der Prinzipien und Methoden von LMB bei Bauprojekten unterstützt (vgl. (R. E. Smith et al. 2011)). Neben IPD ist an dieser Stelle das sog. „Lean Project Delivery System“ (LPDS) zu erwähnen. LPDS ist eine generische holistische Vorstellung der sich gegenseitig beeinflussenden Bauproduktionsprozesse bei einer „leanen“ Projektabwicklung (vgl. (Ballard 2000a) und (Ballard 2008)). LPDS stellt somit einen ganzheitlichen Ansatz zur Projektabwicklung im Bauwesen dar und integriert alle bereits bewährten Ansätze des LMB zur Bildung eines Gesamtansatzes, während IPD sich auf die Gestaltung eines kooperativen Projektumfeldes konzentriert, das eine Umsetzung der LMB-Prinzipien ermöglicht. Beide Ansätze haben viele Gemeinsamkeiten, unterscheiden sich aber von der Sichtweise auf eine „leane“ Projektabwicklung - und ergänzen sich - (vgl. (R. E. Smith et al. 2011)).

Die für diese Arbeit relevanten Methoden des LMB werden im Folgenden erläutert.

2.4.1 Gezielte Gestaltung des Informationsaustauschs

Zur Identifikation und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen ist es erforderlich, dass ein Informationsaustausch zwischen den betroffenen Personen stattfindet. Besonders geeignet sind dafür sog. „Huddle Meetings“ (vgl. (Salem et al. 2006)). Die Zyklen der Treffen orientieren sich dabei an der Dynamik der zu steuernden Bauproduktionsprozesse, so finden diese z.B. in der Produktion (welcher im englischen „Shopfloor“ genannt wird) teilweise täglich und direkt am Arbeitsort statt. In der Planungsphase von komplexen Bauprojekten treffen sich die Planer in sog. „Big rooms“ (vgl. (Ballard 2008)). Der involvierte Personenkreis hängt von den zugehörigen Schnittstellen und der Art der Interaktion ab. Das Zusammenkommen der miteinander verknüpften Personen ist von zentraler Bedeutung, um bisherige Prozessmissstände zu identifizieren (z.B. anhand der sog. Wurzelfehleranalyse³²) und diese mit Hilfe geeigneter Vorgehen (z.B. die Einführung von Ordnung und Sauberkeit) zu beseitigen.

³⁰ Spear und Bowen schreiben hierzu: "Toyota does not consider any of the tools or practices - such as kanban or andon cords, which so many outsiders have observed and copied - as fundamental to the Toyota Production System. Toyota uses them merely as temporary responses to specific problems that will serve until a better approach is found or conditions change. They're referred to as "countermeasures," rather than "solutions," because that would imply a permanent resolution to a problem." (Spear & Bowen 1999).

³¹ vgl. Kapitel 2.4.8.

³² Siehe hierzu weiter unten.

2.4.2 Ordnung und Sauberkeit

Ziel ist die standardisierte Umsetzung von Ordnung und Sauberkeit am Arbeitsplatz. Es ist eine der wesentlichen Methoden zur Reduktion von Verschwendung. Sie setzt sich aus folgenden fünf Punkten zusammen^{33 34}:

- Sortieren der Gegenstände in notwendige und unnötige Gegenstände sowie die Entfernung der Letzteren
- Organisation der notwendigen Gegenstände mit dem Ziel der minimalen Zugriffszeit
- Sauberhaltung von Maschinen und Werkzeugen
- Entwicklung von Standards und regelmäßige Wiederholung der ersten drei Punkte
- Etablierung einer routinemäßigen Einhaltung der entwickelten Standards und Weiterentwicklung der obigen Punkte

Die Einführung von Ordnung und Sauberkeit ist der Ausgangspunkt zur Implementierung von Lean Management in einem Unternehmen. Das Ziel dieser Methode ist, die Beteiligten Verantwortung für den Arbeitsplatz zu lehren und sie dazu zu motivieren, sich mit ihrer Arbeit auseinanderzusetzen (vgl. (Ott 2005)).

Sauberkeit verkörpert allerdings mehr als nur reines Säubern. Im Sinne von Total Productive Maintenance (TPM)³⁵ fällt hierunter auch die Instandhaltung von Werkzeugen und Maschinen. Gerade beim Einsatz teurer Maschinen³⁶ kann somit eine Minimierung der Ausfallzeiten erreicht werden.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Steigerung von Transparenz. Durch Unordnung werden Prozesse intransparent, Behinderungen entstehen aufgrund herumstehender Gegenstände und notwendige Materialien sind nicht griffbereit.³⁷

2.4.3 Wurzelfehleranalyse

Das Ziel dieser Methode ist es den wahren Grund eines Problems zu behandeln und nicht nur dessen Symptome.

Eine etablierte Möglichkeit zur Umsetzung dieser Methode ist das fünfmalige Fragen nach „Warum?“, weshalb die Methode auch unter dem Begriff „5W-Methode“ bekannt ist. Den 5W liegt die Vorstellung zugrunde, dass nach fünfmaligem Fragen der wahre Grund des jeweiligen Problems erkannt worden ist (vgl. (Ohno 2009)). Die Anzahl fünf ist dabei keinesfalls als fixer Wert anzusehen.

Neben dem mehrmaligen Fragen nach „Warum?“ gibt es ergänzend den weitverbreiteten Leitfaden „Wer, wie, was, wieso, weshalb, warum und womit“ (die sog. „7W-Methode“).

³³ vgl. (Imai 1997).

³⁴ Es existieren unterschiedliche Versionen, die allerdings identisch bzgl. ihres Inhalts sind. Häufig wird diese Methode auch als 5S oder 5A bezeichnet. Die "5S" stammen aus den Anfangsbuchstaben der japanischen Version, die "5A" sind eine deutsche Interpretation.

³⁵ TPM zielt auf die Maximierung der Leistungsfähigkeit von eingesetzten Werkzeugen und Maschinen ab. Es beinhaltet Punkte wie die Entwicklung eines Instandhaltungssystems und Weiterbildung im Bereich Instandhaltung, Problemlösung und weitere Tätigkeiten, die dabei helfen einen Arbeitsplatz mit einer hohen Verfügbarkeit und hohen Sicherheit zu erreichen (für weitere Informationen siehe z.B. (Imai 1997)).

³⁶ Was im Bauwesen insbesondere im Erbau- und Straßenbau der Fall ist.

³⁷ Ein Beispiele der Umsetzung im Bauwesen ist in (Ikuma et al. 2011) zu finden.

2.4.4 Wertstromanalyse bzw. Wertstromdesign

Die Wertstromanalyse ist eine Methode zur Erfassung und Beschreibung des gesamten Wertstroms³⁸ eines Produktes (vgl. (Arnold & Furmans 2009)). Ziel der Wertstromanalyse ist die transparente Darstellung der Produktionsprozesse und ihrer Verknüpfungen. Das formale Vorgehen wurde von Rother und Shook standardisiert (vgl. (Rother & Shook 2004)). Ein wesentliches Ziel der Wertstromanalyse ist die Bestimmung der sog. Durchlaufzeit (vgl. Kapitel 2.3). Die Wertstromanalyse ist wiederum die Ausgangssituation für die Umsetzung des sog. Wertstromdesigns³⁹. Hierzu wird zunächst die IST-Situation des Wertstroms identifiziert und aus den Ergebnissen ein zu erreichender Soll-Zustand abgeleitet. Zur Erreichung des Soll-Zustands werden einzelne Schritte definiert und gemäß des PDCA Zyklus umgesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Ziel von Wertstromdesign ist die Effizienzsteigerung in den Zieldimensionen: Variabilität, Qualität, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit (vgl. (Erlach 2007)).⁴⁰

2.4.5 Last-Planner-System™

Die bekannteste Methode von LMB ist das von Glenn Ballard und Greg Howell entwickelte Last-Planner-System™ (LPS) (vgl. (Ballard 2000c), (Howell & Macomber 2002) und (Ballard & Howell 2003)). Das LPS ist ein System zur Produktionsplanung und -steuerung. Den Kern bildet die Einhaltung verbindlicher Zusagen. Der wesentliche Unterschied zu anderen Methoden des Projektmanagements ist, dass diese Zusagen gemeinsam mit den Personen erarbeitet werden, die im späteren Projektverlauf für die Einhaltung verantwortlich sind und, dass diese auch die Möglichkeit haben einen tatsächlichen Einfluss auf die Zusagen zu nehmen.

Das LPS lässt sich bezüglich des Ablaufs in drei wesentliche Phasen einteilen⁴¹:

- **Kooperative Phasenplanung**

Ergänzend zur standardgemäß existierenden Grobterminplanung (für den gesamten Projektverlauf) werden innerhalb der Kooperativen Phasenplanung gemeinsam mit Vertretern der wesentlichen Projektbeteiligten die Inhalte der Arbeitspakete und deren Reihenfolge innerhalb einer Planungsphase angepasst. Hierzu wird interaktiv mit Haftzetteln rückwärtsgerichtet vom Fertigstellungstermin einer Projektphase der Ablauf geplant, d.h. wann welche Arbeitspakete stattfinden und welche Vorbedingungen hierfür einzuhalten sind. Je nach Projektkomplexität wird ein angemessener Planungshorizont gewählt, üblich sind ca. 3 bis 6 Monate⁴². Die Ausführenden legen die Dauer ihrer Arbeitspakete fest und erläutern ggf. wie diese zustande kommen. Anschließend wird in der Gruppe analysiert wie der entstandene Terminplan optimiert werden kann. Die Kooperative Phasenplanung wird mit einer gemeinschaftlichen Zustimmung bezüglich des gemeinsam erstellten Ablaufs abgeschlossen.

- **Vorschauplanung**

Während die Kooperative Phasenplanung sich auf den Planungshorizont einer Projektphase bezieht, fokussiert die Vorschauplanung sich auf einen Ausschnitt innerhalb einer geplanten Projektphase. Rollierend wird ein in die Zukunft gerichteter Zeitraum (sog. „Vorschauzeitraum“) einer genaueren Planung unterworfen. Ausgangslage bildet die

³⁸ Der Begriff Wertstrom umfasst in diesem Zusammenhang alle wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Aktivitäten, die notwendig sind um ein Produkt/eine Dienstleistung zu erstellen/erbringen.

³⁹ Die Methode wird genauer in (Rother & Shook 2004), (Smalley 2005) und (Rother & Harris 2006) beschrieben.

⁴⁰ Beispiele für die Umsetzung im Bauwesen sind z.B. (Arbulu et al. 2003), (Arbulu & Iris D. Tommelein 2002), (Schmitt 2008a) und (Börkircher & Gamber 2010).

⁴¹ vgl. (Kirsch 2008), (Hofacker 2010), (Heidemann 2010) und (Sonntag & Hickethier 2010)).

⁴² Die Wahl hängt insbesondere von den wesentlichen Meilensteinen des Projekts ab, da diese sich besonders als Phasengrenze eignen.

Kooperative Phasenplanung. Der Vorschauzeitraum wird in Abhängigkeit der Projektkomplexität gewählt (üblich sind ca. 6 Wochen). Es wird analysiert, welche Voraussetzungen zu schaffen sind, damit die Produktion wie geplant ablaufen kann. Die Vorschauplanung wird wöchentlich aktualisiert. Ziel ist zu gewährleisten, dass die Arbeitspakete am jeweiligen Starttermin auch wirklich ausführbar sind.⁴³

- **Wochenplanung bzw. Tagesplanung**

Während die Vorschauplanung die generellen Bedingungen für den Arbeitsbeginn zum jeweiligen Zeitpunkt absichert, wird in der Wochen- oder Tagesplanung in regelmäßigen Besprechungen mit allen Beteiligten der Arbeitsfortschritt analysiert und die weiterführende Planung besprochen und aktualisiert. Hierzu werden aus geplanten Aktivitäten verbindliche Arbeitszusagen⁴⁴. Die Erfüllung der Arbeitszusagen wird anhand des sog. PEA-Werts⁴⁵ gemessen.

Diese strukturierte Vorgehensweise bildet wiederum die Grundlage für die kontinuierliche Verbesserung des Arbeitsablaufs. Die PEA-Werte werden überprüft und es wird bei niedrigen Werten analysiert, was die Ursachen hierfür sind. Sind die PEA-Werte sehr gut, ist zu überprüfen, ob eine Anpassung der Zusagen sinnvoll ist.

In Abbildung 2-6 ist der schematische Ablauf dargestellt. Die abgebildeten KVP-Zyklen (vgl. Kapitel 2.2.1) deuten an, dass ein wesentlicher Punkt des LPS die kontinuierliche Verbesserung der Planung ist. Verbesserungen der Planung auf übergeordneter Ebene haben Einfluss auf die darunterliegenden Planungsebenen und umgekehrt.

Ballard fasst die Prinzipien des LPS wie folgt zusammen⁴⁶:

- Plane um so genauer je näher das Ausführungsdatum rückt
- Erarbeite Pläne zusammen mit denjenigen, die sie ausführen
- Analysiere mögliche Probleme im Team und beseitige diese gemeinsam
- Mache selbst zuverlässige Zusagen und bringe Partner dazu, dir ebenfalls zuverlässige Zusagen zu geben
- Lerne aus Fehlern

Das LPS wird mittlerweile international angewendet⁴⁷ und ist auch in der deutschen Bauindustrie bekannt (vgl. (Schmitt & Wladimir 2012), (Theis 2011), (Simon et al. 2009) und (DB 2008)).

⁴³ Die Vorschauplanung hat als Schnittstellenfunktion zwischen Kooperativer Phasenplanung und Wochenplanung eine besondere Rolle im LPS. Eine ausführlichere Diskussion hierzu ist in (Hamzeh et al. 2008) zu finden.

⁴⁴ Diese Tätigkeit entspricht der, aus der stationären Industrien bekannten, Auftragsfreigabe (vgl. (M. Schmidt 2007)).

⁴⁵ PEA= Prozent erledigter Arbeiten. Der PEA-Wert bildet sich aus dem Verhältnis von getätigten Zusagen zu tatsächlich erfüllten Zusagen (vgl. (Schmitt 2008b)).

⁴⁶ vgl. (Ballard et al. 2009).

⁴⁷ Anwendungsbeispiele des LPS sind z.B. in (DB 2008), (Koskela et al. 1997), (Ballard & Koskela 1998), (Ballard 1999), (Ballard 2000c), (Ballard 2000b), (Ballard 2002), (Hyun Jeong et al. 2004), (Romano 2008) und (Ballard et al. 2009) zu finden.

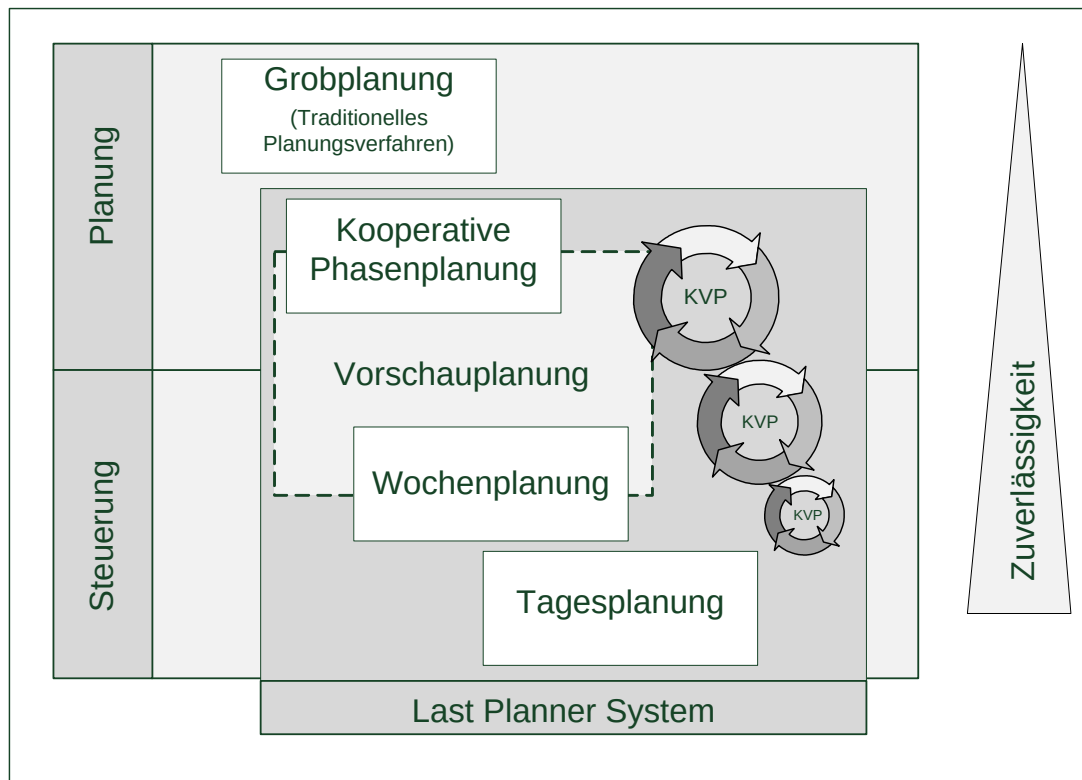


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Last Planner Systems (vgl. (Gehbauer 2008))

2.4.6 Visuelles Management

Unter visuellem Management versteht man den Einsatz einfacher, kognitiv effektiver visueller Werkzeuge, die insbesondere dazu eingesetzt werden operative Prozesse zu unterstützen (vgl. (Tezel et al. 2010)). Die eingesetzten Werkzeuge sollen dabei helfen Folgendes zu verbessern:

- Die Organisation des Arbeitsplatzes,
- die menschlichen Leistungsfähigkeit im Allgemeinen und
- den Informationsaustausch.

Ein Ziel ist insbesondere die Steigerung der Prozesstransparenz⁴⁸ durch Unterstützung bei der Informationsverarbeitung. In einer komplexen Umgebung sind die Informationsflüsse häufig ebenfalls komplexer Natur⁴⁹. Komplexität führt zu Unsicherheit bezüglich der Einschätzung von Systemzuständen und somit zu Entscheidungen, die auf einer unsicheren Grundlage getroffen wurden (vgl. (Vidal & Marle 2008)). Komplexe Informationsflüsse zeichnen sich in diesem Zusammenhang insbesondere dadurch aus, dass viele Informationsquellen und -senken⁵⁰ vorhanden sind, dass die zugehörigen Informationsflüsse häufig nicht aus einer direkten Verbindung zwischen

⁴⁸ Moser und Santos fassen die Vorteile einer gesteigerten Transparenz wie folgt zusammen: „Simplification and greater coherence in decision making; Stimulation of informal contacts throughout different hierarchical levels; Contribution to introduction of decentralization policies; Helps to broaden employees participation and autonomy in management; More effective distribution of responsibilities; Increase in employee morale; More effectiveness of production scheduling; Simplification of production control systems; Rapid comprehension and response to problems.“ (Moser & Santos 2003)

⁴⁹ Dies gilt für soziotechnische Systeme wie dem Bauwesen insbesondere (vgl. (Tezel et al. 2010)). Bertelsen analysiert in (Bertelsen 2003) das Bauwesen und kommt zu dem Schluss, dass es sich um ein komplexes System handelt.

⁵⁰ Ein Knotenpunkt in einem „Informationsnetzwerk“ kann hierbei sowohl Informationssenke als auch -quelle sein.

Informationsquelle und -senke, sondern aus einer Abfolge mehrere Verbindungen zwischen unterschiedlichen Quellen und Senken bestehen und, dass die Beziehungen zwischen Informationsquellen und -senken dynamisch sind. Ein Informationsempfänger muss die Informationen filtern und anschließend verarbeiten⁵¹. Eine Steigerung der Prozesstransparenz durch den Einsatz von Zeigetafeln, Bildschirmen, Farben, Formen, Markierungen usw. führt zu einer Reduktion der Komplexität, indem eine schneller und insbesondere einfachere Informationsverarbeitung ermöglicht wird.

Visuelles Management beinhaltet insbesondere die Darstellung von Prozesszuständen, Kennzahlentwicklungen und Arbeitsabläufen. Neben der reinen Abbildung der Systemzustände, dienen die Darstellungen als Ausgangslage für Diskussionen mit Prozessbeteiligten bei der Umsetzung von Maßnahmen zur kontinuierlichen Verbesserung (vgl. (Hofacker et al. 2010)). Eine weitere wesentliche Aufgabe von visuellem Management ist die Kommunikation von gesetzten Zielen. Nur wenn gesetzte Ziele transparent dargestellt werden, können sich die Beteiligten daran orientieren. (vgl. (Imai 1997)).

Visuelles Management hängt auch stark mit „Ordnung und Sauberkeit“ (vgl. 2.4.2) zusammen, da beide die Prozesstransparenz steigern (vgl. (Imai 1997) und (Tezel et al. 2010)).

2.4.7 Building Information Modeling

Im Wesentlichen handelt es sich bei Building Information Modeling (BIM) um eine Technologie zur visuellen Informationsübertragung (Sacks et al. 2010). In Praxis und Wissenschaft wird häufig missverständlicher Weise angenommen, dass BIM nur das mit Informationen angereicherte virtuelle Abbild⁵² eines Projekts ist. Ursache hierfür ist vermutlich, dass der Name des virtuellen Modells ("Building Information Model") nahezu mit BIM übereinstimmt und die Begriffe "Model" und "Modeling" nicht korrekt unterschieden werden. Der Begriff "Modeling" setzt den Prozess (also das "wie") in den Vordergrund. Insofern handelt es sich hierbei im weiteren Sinne um eine Managementmethode.

Sacks et al. (2010) stellt den Zusammenhang zwischen BIM und LMB dar. Er weist gleichzeitig auf mögliche Gefahren hin. Zu den Vorteilen der Nutzung von BIM gehören insbesondere⁵³:

- Verringerung später Änderungen aufgrund einer besseren Planung
- Visualisierung von Designmängeln (Fehleridentifikation wird erleichtert)
- Mehrdimensionale Visualisierung erleichtert das Verständnis und Beurteilung von Zusammenhängen
- Die Konsequenz von Änderungen wird direkt sichtbar
- Teilweise automatische Aktualisierung bestimmter Sachverhalte (z.B. Massenermittlung bei Änderungen oder "Clash Detection" bei Integration unterschiedlicher gewerkespezifischer Modelle)

⁵¹ Imai schreibt hierzu passend: „Most information originating from *gemba* goes through many managerial layers before reaching top management, and the information becomes increasingly abstract and remote from reality as it moves upward. Where visual management is practiced, however, a manager can see problems at a glance ...“ (Imai 1997)

⁵² Das reine Abbild ohne den dahinterliegenden Prozess wird im englischsprachigen Raum als „BIM Model“ bezeichnet. Thomsen et. al. definieren den Inhalt eines „BIM models“ wie folgt:

„A BIM model is a digital description of a project. It may include information such as the physical configuration, programmatic requirements, functional characteristics, specifications, systems performance, supply chain threads, construction sequence, cost, or any other information that might be useful.“ (Thomsen et al. 2010)

⁵³ Hierbei handelt es sich um eine verdichtete Darstellung der aufgestellten Interaktionen von Lean Construction und BIM nach Sacks et. al (2010). Der letzte Punkt wurde ergänzt.

- Erleichterte Erfassung der Kundenanforderungen
- Verbesserung der Konsistenz, da nur an einem Modell geplant wird (nicht wie zuvor an mehreren Planunterlagen)
- Verbesserung der Kooperationsmöglichkeiten zwischen Personen unterschiedlicher Fachdisziplinen
- Einfachere Analyse von Planungs- und Ausführungsvarianten
- Einfache Erstellung von Animationen (z.B. für kritische Bauabläufe)
- Schnellerer und qualitativ besserer Informationsaustausch (online Verfügbarkeit sämtlicher aktueller Daten)
- Reduzierung der Planungsdauer
- Erdbauspezifisch: Möglichkeit zur Nutzung der Daten zur Maschinensteuerung und Visualisierung des Baufortschritts (vgl. (Kirchbach et al. 2012))

Sacks et. al (2010) macht jedoch deutlich, dass diese Vorteile nur existieren, wenn die betroffenen Prozesse entsprechend angepasst werden⁵⁴. Ein geeignetes unterliegendes Vertragswerk - wie die IPD -, trägt dazu bei, dass Probleme (z.B. mangelnde Kooperation der Nutzer) verringert bzw. beseitigt werden (vgl. (Thomsen et al. 2010)).

2.4.8 Vertragliche Gestaltung

Einer der wichtigsten Punkte des Lean Managements ist die Etablierung von kooperativen Verhalten. Beispielsweise ist die Umsetzung des LPS nur möglich, wenn die Projektpartner Bereitschaft zur Zusammenarbeit zeigen. Die Bereitschaft zur Kooperation der Projektpartner hängt auf der einen Seite von der persönlichen Einstellung hierzu ab. Auf der anderen Seite hängt die Bereitschaft zur Kooperation auch von den im Projekt vorhandenen Möglichkeiten zur Verwirklichung der jeweiligen individuellen Interessen der einzelnen Projektpartner ab⁵⁵. Die Art und Weise der vertraglichen Gestaltung legt einen wesentlichen Teil dieser Möglichkeiten fest und entscheidet somit auch über die Motivation der Projektpartner sich an kooperativen Verhalten zu beteiligen⁵⁶.

Insbesondere ist bei der vertraglichen Gestaltung von Schnittstellen darauf zu achten, dass ein Optimum aus Sicht des Gesamtsystems entsteht (vgl. (Sonntag & Hickethier 2010)). Dies kann auch bedeuten, dass Projektpartner zum Wohle der anderen Projektpartner handeln müssen und dabei einen Verlust der eigenen Interessen hinnehmen müssen. Damit dies in der Praxis nicht zu Rechtsstreitigkeiten und anderen Problemen führt, sind entsprechende Entschädigungsklauseln einzuführen⁵⁷.

Eine besonderer Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der aus den USA stammenden Vertragsform "Integrated Form of Agreement" (IFOA) zu Gute. Die IFOA ist darauf ausgerichtet, die speziellen Bedürfnisse bei der Umsetzung von Lean Prinzipien im Bauwesen zu unterstützen. Der Vertragstyp entspricht dem sog. "Relational Contracting"⁵⁸ was mit "relationalen Vertrag" ins Deutsche

⁵⁴ vgl. hierzu Thomsen et al.: „The ultimate objective is to build an integrated BIM - a virtual building before we make expensive mistakes with concrete, glass and steel. But tradition, contractual separation, archaic laws, technical limitations, interoperability problems and culture hinder us.“(Thomsen et al. 2010)

⁵⁵ Börkircher schreibt hierzu: „Aus subjektiver Perspektive der einzelnen Gewerke verspricht man sich von einer unkooperativen Verhaltensweise oft einen größeren Erfolg, da er für das einzelne Gewerk und dessen Leistungserstellung oft mit weniger Risiken behaftet ist.“(Börkircher 2011)

⁵⁶ Eine generelle Betrachtung der Wirkung von Anreizsystemen ist in (J. W. Darrington & Howell 2010) zu finden. In (Thomsen et al. 2010) wird erläutert, was bei der Wahl von Anreizen innerhalb eines IPD-Vertrags zu berücksichtigen ist.

⁵⁷ Für weitere Informationen siehe (Heidemann 2010).

⁵⁸ Eine Übersicht zu den bisherigen eingesetzten Vertragsmodellen ist in (Heidemann 2010) und (R. E. Smith et al. 2011) zu finden.

übersetzt wird. Man kann einen relationalen Vertrag gegenüber den sogenannten "transaktionalen Verträgen" abgrenzen. Beim transaktionalen Vertrag liegt der Fokus auf der Substanz des Austauschs (d.h. der Fokus liegt darauf, was zu erbringen ist). Demgegenüber liegt der Fokus bei einem relationalen Vertrag auf der Art und Weise der Leistungserbringung (d.h. der Fokus liegt darauf, wie etwas zu erbringen ist) (vgl. (Heidemann 2010) und (Sonntag & Hickethier 2010)). Die IFOA muss für jedes Bauprojekt individuell angepasst werden, da die Projekte sowohl von ihrer Art und den existierenden Randbedingungen als auch von ihrer Zielsetzung abweichen können. Die IFOA ist in ihrem vollen Umfang insbesondere für komplexe und große Projekte geeignet.

Insbesondere komplexe Produktionen⁵⁹ sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Vielzahl an Schnittstellen existiert (seien es Schnittstellen zu weiteren Partnern oder Schnittstellen innerhalb der eigenen Produktion zwischen einzelnen Produktionsabschnitten)⁶⁰. Die Anzahl der Schnittstellen steigt aufgrund allgemein steigender Komplexität, insbesondere auch im Bauwesen. Gleichzeitig wird der Produktion eine immer größere Flexibilität abverlangt. Um unter diesen Umständen nachhaltig bestehen zu können ist in vielen Bereichen bereits eine Fokussierung der Prozesse erfolgt. Die IFOA ist in diesem Zusammenhang eine mögliche vertragliche Gestaltung die diesem Umstand Rechnung trägt, da sie wie bereits erwähnt, den Fokus darauf legt, wie ein Bauobjekt entsteht (d.h. den Fokus auf die Prozesse legt). Sie bildet somit eine vertragliche Basis für den Ablauf der Bauproduktionsprozesse, allerdings ohne diese scharf zu definieren, da auch diese sich im Laufe der Zeit verändern können⁶¹. Die IFOA wurde bisher nur exemplarisch bei wenigen Projekten in den USA eingesetzt⁶².

Neben der IFOA ist eine weitere Vertragsform zu erwähnen, dass sog. "Alliance Contracting". Alliance Contracting wird im Deutschen "Allianzvertrag" genannt. Das Grundprinzip des Allianzvertrags ist die Bildung einer fiktiven Projektgesellschaft, die als gemeinsames Ziel die Optimierung des Gesamtnutzens des Projekts verfolgt. Die Umsetzung des Ziels wird durch eine stärkere Bindung der Projektpartner untereinander erreicht. Zusätzliche Regelungen wie z.B. Streitverbot, Rechtsmittelverzicht, Einstimmigkeitsgebot und die Etablierung einer "no-blame-culture" unterstützen diese Zielerreichung. Obwohl der Allianzvertrag viele Punkte enthält, die eine Umsetzung von Lean Prinzipien im Bauwesen unterstützen, ist er aufgrund seiner Entstehungsgeschichte nicht darauf spezialisiert die Lean Prinzipien in vollem Umfang, aber insbesondere auch die bereits bestehenden Lean Methoden im Bauwesen, zu berücksichtigen. In Australien wurden bereits häufig Allianzverträge eingesetzt, wobei sie im Infrastrukturbau einen besonders hohen Anteil haben. Im Straßenbau wurden 29% aller öffentlichen Infrastrukturbauwerke mit Allianzverträgen umgesetzt (vgl. (Heidemann 2010) und (Sonntag & Hickethier 2010)).

Es ist deutlich darauf hinzuweisen, dass diese innovativen Arten der Vertragsgestaltung in Deutschland bisher nur bei privaten Bauherren möglich sind, da öffentliche Bauherren an die Vorgaben der VOB⁶³ gebunden sind (vgl. (Sonntag & Hickethier 2010)). Bauaufträge im Infrastrukturbereich werden hauptsächlich von öffentlichen Auftraggebern vergeben. Heidemann stellt in (Heidemann 2010) die im Rahmen der Gesetzgebung für öffentliche Bauherren möglichen Umsetzungen von Lean Management im Bauwesen vor.

⁵⁹ In (Lanza 2013) ist eine Übersicht zur Beurteilung der Komplexität in der Produktion zu finden.

⁶⁰ Eine allgemeine Diskussion über Komplexität und komplexe Systeme und deren Definition ist in (Chu et al. 2003) zu finden.

⁶¹ Dies resultiert aus den Besonderheiten der geschäftlichen Beziehungen im Bauwesen. Beispielsweise ist gerade zu Beginn eines Projekts das Bausoll noch nicht vollständig definiert, gleichzeitig wird durch "klassische" transaktionale Verträge aber genau basierend auf diesem der Bauvertrag abgeschlossen. Dies hat zur Folge, dass Probleme bei - unweigerlich entstehenden - Änderungen auftreten.

⁶² In (Heidemann 2010) befindet sich eine Darstellung durchgeführter Projekte.

⁶³ VOB = Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen

Spang weist in (Spang 2006) darauf hin, wie wichtig eine partnerschaftliche Projektabwicklung für den Projekterfolg ist. Er kritisiert bisherige Projektabwicklungsformen in Deutschland und stellt Lösungsmöglichkeiten vor, die denjenigen der IFOA und des Allianzvertrags grundsätzlich sehr ähnlich sind.

2.5 Transformation-Flow-Value Theorie

Jeder Vorstellung von Wissen⁶⁴ liegt eine spezifische Semantik und eine spezifische Syntax zu Grunde. In der Wissenschaft wird diese Vorstellung für einen abgegrenzten Sachverhalt in Form einer Theorie zusammengefasst. Die grundlegende Theorievorstellung in dieser Arbeit ist die Transformation-Flow-Value Theorie (TFV).

Die TFV Theorie von Koskela⁶⁵ basiert auf bisher bekannten Produktionsparadigmen, die modellhaft in drei wesentliche Teile gegliedert werden können: Die Theorie der Transformation, die Flusstheorie und die Theorie der Wertschöpfung. Eine Erläuterung der Theorie der Wertschöpfung befindet sich in Kapitel 2.2.3. Die Theorie der Transformation und die Flusstheorie sowie die sich ergebende TFV Theorie werden im Folgenden erläutert.

2.5.1 Theorie der Transformation

Die Theorie der Transformation lässt sich bis zum Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts zurückverfolgen und beruht auf dem Produktionsmodell von Taylor. Die Grundüberlegung hinter dem unter dem Namen Taylorismus⁶⁶ bekannten Paradigma ist, dass einzelnen Aufgaben einer Produktion aus dem Gesamtablauf herausgelöst betrachtet werden können. Ergebnis dieser Betrachtungsweise ist, dass kurze repetitive Arbeitsschritte entstehen.

Allgemein stammt die hinter der Theorie der Transformation liegende Vorstellung aus dem Reduktionismus. Unter Reduktionismus versteht man eine philosophische Lehre, die versucht Systeme dadurch zu beschreiben, dass die Funktionsweise der einzelnen Bestandteile des Systems erklärt werden. Eine weitere Vorstellung ist, dass diese Reduktion der Funktionsweise eines Systems auf die Funktionsweise kleinerer Teilsysteme bis auf die Ebene der kleinsten Teilchen des Universums betrieben werden kann. Börkircher wendet das Verfahren exemplarisch an einem Beispiel der Bauproduktion an (vgl. Abbildung 2-7).

Aus der Theorie der Transformation können folgende Hauptprinzipien abgeleitet werden (vgl. (Koskela 2000):

- Ein Transformationsprozess kann in kleinere Transformationsprozesse unterteilt werden
- Die Produktionskosten können dadurch minimiert werden, dass die Kosten der einzelnen Teile des Transformationsprozesses minimiert werden
- Es ist von Vorteil die Prozesse durch Puffer zu entkoppeln

⁶⁴ Was unter „Vorstellung von Wissen“ zu verstehen ist, soll anhand eines kurzen Beispiels erläutert werden: Man glaubt etwas zu verstehen z.B. man sieht einen Baum und verbindet mit diesem Baum eine gewisse Vorstellung davon, was ein Baum ist und welche Eigenschaften und Fähigkeiten er besitzt. Eine weitere Person wird unter einem Baum evtl. etwas anderes verstehen (z.B. konkrete Baumart). Es gibt allerdings evtl. eine Schnittmenge der Vorstellungen (z.B. ein Baum ist eine Pflanze).

⁶⁵ vgl. (Koskela 2000) und (Bertelsen & Koskela 2002).

⁶⁶ Dieser Begriff ist in diesem Zusammenhang als die dahinter liegenden Weltanschauung zu verstehen und nicht - so wie heute häufig üblich - als Begriff der Kritik zu verstehen.

Die Fokussierung auf einen bestimmten Ausschnitt der Produktion und Vernachlässigung der Berücksichtigung des Zusammenspiels mehrerer Ausschnitte sowie die Idee der zugehörigen strikten Vorgaben können als wesentliche Nachteile dieser Modellvorstellung angesehen werden.

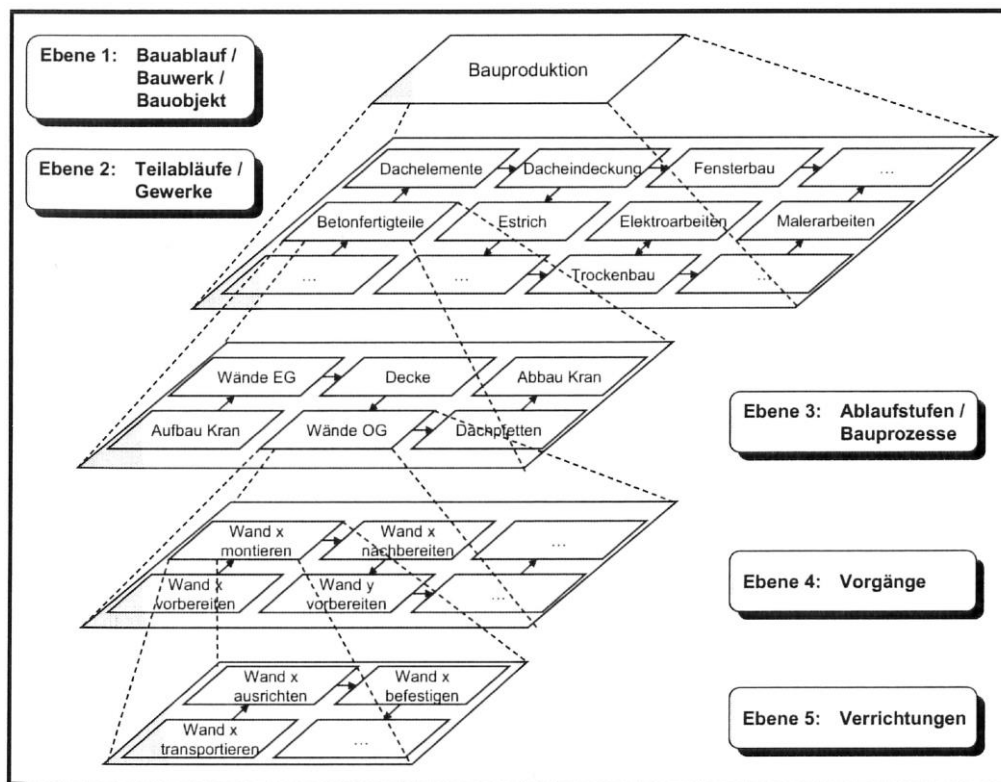


Abbildung 2-7: Exemplarische Darstellung eines Bauproduktionsprozesses als Transformationsprozess (Börkircher 2011)

2.5.2 Flusstheorie

Obwohl schon länger implizit in der Praxis vorhanden (z.B. das Fließband von Henry Ford) ist die dahinter liegende Theorie vernachlässigt worden, bis sie um 1980 wiederentdeckt wurde. Lange wurde versucht einzelne Prozesse oder Prozessausschnitte zu optimieren, ohne dabei zu berücksichtigen, dass diese nur ein Teil eines übergeordneten Gesamtablaufs sind. Die Konzentration auf einen Einzelprozess oder Prozessausschnitt führt letztendlich dazu, dass die Prozessvorläufer oder Nachläufer bei der lokalen Optimierung nicht beachtet werden und somit Probleme an den Schnittstellen entstehen (z.B. große Materialbestände, schlechte Auslastungen usw.).

Insbesondere die Entwicklungen von Just-in-time⁶⁷, der Materialflusslehre in Zusammenhang mit der Warteschlangentheorie⁶⁸, der Theorie of Constraints⁶⁹ und von Supply-Chain-Management⁷⁰ haben dazu geführt, dass der neue Fokus auf der Optimierung von größeren Prozessabschnitten oder im Idealfall sogar auf der Optimierung des Gesamtablaufs liegt⁷¹.

⁶⁷ vgl. z.B. (Ohno 2009).

⁶⁸ vgl. z.B. (Hopp & Spearman 2011) und (Arnold & Furmans 2009).

⁶⁹ vgl. (Goldratt 1990) und (Goldratt & Cox 2004).

⁷⁰ vgl. z.B. (Arndt 2008).

⁷¹ Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen Praxis und Theorie festzustellen.

2.5.3 TFFV-Modell

Wie Koskela passend darstellt, handelt es sich bei den drei Theorien: Transformation, Fluss und Wertschöpfung um sich gegenseitig ergänzende Theorien. Die Theorie der Transformation nimmt die Sichtweise der Wandlung von eingehenden Produkten (Input) in Produkte höherer Wertigkeit (Output) ein. Die Flusstheorie verbindet diese einzelnen Transformationsprozesse und berücksichtigt deren Schnittstellen. Die Theorie der Wertschöpfung gibt die Zielvorgabe der Produktion vor. Ziel ist die Generierung von Wert für den Kunden unter Einhaltung der ökonomischen Randbedingungen (vgl. (Koskela 2000)).

Koskela erarbeitet aus den drei Theorien keine alleinstehende Theorie, da diese wiederum das Alleinstellungsmerkmal jeder einzelnen Theorie verneinen würde. Das besondere an der TFFV-Theorie von Koskela ist, dass er erkannt hat, dass Produktionsprozesse parallel aus mehreren Sichtweisen analysiert werden müssen (vgl. (Koskela 2000) und (Bertelsen & Koskela 2002)). Eine Übersicht zu den drei Sichtweisen auf eine Produktion ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

	Transformation	Fluss	Wertschöpfung
Sichtweise auf die Produktion	Eine Transformation von Input in Output	Der Fluss von zu bearbeitenden Objekten durch die einzelnen Prozessschritte (z.B. Bearbeitung, Transport und Warten)	Die Schaffung von Wert aus Sicht des Kunden
Ziel	Effiziente Produktion	Minimierung der Durchlaufzeit	Maximierung der möglichen Wertschöpfung
Eingesetzte Methoden	z.B. Work breakdown structure und Prozess-Kaizen	z.B. Wertstromdesign, Fluss-Kaizen und Taktung	z.B. Anforderungsmanagement und Nutzwertanalyse
Beitrag der Theorie	Lokale Optimierung von Prozessen zur Steigerung der Effizienz	Globale Optimierung von verknüpften Prozessen zur Minimierung der Durchlaufzeit	Globale Maximierung der möglichen Wertschöpfung
Name für praktische Anwendung	Aufgabenmanagement	Flussmanagement	Wertschöpfungsmanagement

Tabelle 2-1: Die drei Sichtweisen auf eine Produktion (in Anlehnung an (Koskela 2000))

2.5.4 Begründung der Wahl der TFFV-Theorie als gewählte Produktionstheorie

Erklärungsversuche von komplexen Sachverhalten sind dadurch geprägt, dass man die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung auf einer Ebene unter der jeweiligen Problemstellung betrachtet, d.h. man unterteilt die Problemstellung in Teilprobleme und versucht diese zu verstehen. Diese aus den naturwissenschaftlichen Fragestellungen (insbesondere der Physik) stammende Methode vernachlässigt jedoch, dass ein komplexer Sachverhalt häufig mehr ist als seine isoliert betrachteten Einzelteile. Verschlimmert wird das Ganze dadurch, dass man dazu neigt, Sub-Probleme von Sub-Problemen zu bilden⁷² und bei jeder isolierten Betrachtung einer Problemebene versäumt, die existierende Emergenz zu berücksichtigen. Insbesondere im Bauwesen, das durch einen stark vernetzten und sozio-technischen Charakter geprägt ist, ist der Faktor Emergenz jedoch zu berücksichtigen.

Das TFFV-Modell ist momentan das einzige Modell, dass den Faktor Emergenz explizit durch das Zusammenspiel von Transformation, Fluss und Wertschöpfung berücksichtigt.

⁷² Man könnte dieses Vorgehen auch auf beliebig viele Problemebenen anwenden.

2.6 Allgemeine Ursachen von Verschwendung in Produktionsvorgängen

Die Existenz von Verschwendung in der Produktion hat nach Koskela im Allgemeinen drei Ursprünge (vgl. (Koskela 2000)): Die Struktur der Produktion, die Art und Weise der Produktionssteuerung und die Natur der Produktion.

Unter **Struktur der Produktion** sind die Organisation des physischen Materialflusses und des zugehörigen Informationsflusses zu verstehen. Die Struktur der Produktion wird in der längerfristigen Produktionsplanung festgelegt und betrifft insbesondere folgende Punkte (vgl. (Stadtler 2008) und (Arnold & Furmans 2009)):

- Art und Anzahl der **Schnittstellen**

Die Produktion durchläuft mehrere miteinander verknüpfte Arbeitsstationen. In der Produktionsplanung wird festgelegt wie viele einzelne Arbeitsstationen zur Erstellung des Endproduktes vorgesehen sind. Das Bilden einer weiteren Arbeitsstation bedeutet gleichzeitig die Bildung einer weiteren Schnittstelle. An der Schnittstelle sind zusätzliche nicht wertschöpfende Tätigkeiten notwendig wie: Informationsübergabe, Inspektion, Warten und zusätzliche Bewegung.

- Gestaltung des **Informationsflusses**

Der Informationsfluss ist so zu gestalten, dass die Arbeitsstationen bzw. die darin arbeitenden Menschen und Maschinen mit den notwendigen Informationen versorgt werden (z.B. Reihenfolgenplanung, Losgrößen, Aufgabenbeschreibungen, Materialbedarf etc.). Ungenügende oder zu viele Informationen sowie die Art der Übermittlung (visuell, digital oder mündlich) beeinflussen den Grad der Verschwendung.

- Wahl des **Produktionslayouts**

Geklärt wird, wo welche Maschinen, Arbeitskräfte etc. positioniert (d.h. Arbeitsstationen gebildet und die räumliche Anordnung bestimmt) werden. Das Produktionslayout beeinflusst den Arbeits- und Materialfluss.

Die **Art und Weise der Produktionssteuerung** legt fest, durch welche Regeln der operative Ablauf der Produktion bestimmt wird (vgl. (Schuh & Lassen 2006)). Im Wesentlichen sind folgende Sachverhalte betroffen:

- Art der eingeführten **Steuerungsmechanismen**

Durch die eingeführten Steuerungsmechanismen wird bestimmt, wann ein Eingriff in das System erfolgt und wann nicht, d.h. nur wenn der Steuerungsmechanismus bestimmte Sachverhalte berücksichtigt (wie z.B. Wartezeiten, Puffergrößen, Auslastungen etc.), werden diese auch von der Steuerung erfasst. Der innerhalb einer Produktion vorgefundene Anteil an Verschwendung ist von Eignung und Existenz der Steuerungsmechanismen abhängig.

- Ablauf des **Informationsflusses**

Der Informationsfluss ist ebenfalls Teil der Produktionssteuerung, da die aus den existierenden Steuerungsmechanismen resultierenden notwendigen Systemeingriffe erkannt (Identifikation), kommuniziert (Eskalation) und umgesetzt (Implementierung) werden müssen.

Die **Natur der Produktion** beschreibt die besonderen Eigenschaften und Randbedingungen einer Produktion. Je nach Tätigkeitsfeld (z.B. Automobilproduktion oder Bauproduktion) existieren

unterschiedliche Ursachen für Verschwendung. Insbesondere sind folgende Verschwendungsquellen zu erwähnen:

- Die **Produktart**

Das zu erstellende Produkt kann bezüglich seiner Eigenschaften und Anforderungen sehr unterschiedlich sein, z.B. Komplexität, Materialeigenschaften und Qualifikationsanforderungen für die Bearbeitung. Aus den produktspezifischen Eigenschaften und Anforderungen resultieren individuelle Quellen für Verschwendung.

- Den spezifischen **Randbedingungen der Produktion**

Zur Erläuterung wird die Automobilproduktion und die Bauproduktion exemplarisch gegenübergestellt⁷³:

- Automobilproduktion:

- Serienfertigung (Übung durch Wiederholung, „einfachere“ Optimierung)
 - Produktion findet am Ort der Fabrik statt (witterungsunempfindlich, gleichbleibende Produktionsstruktur mit gleichbleibenden Beziehungen⁷⁴)
 - Existenz von längeren Vertragsbeziehungen zu Lieferanten (gegenseitige Schnittstellenoptimierung ist relativ einfach)
 - usw.

- Bauproduktion:

- Einzelfertigung (jede Bauaufgabe ist ein Unikat)
 - Produktion findet auf der Baustelle statt (witterungsempfindlich, ständiger Wechsel der Produktionsstruktur und der Beziehungen)
 - Meist kürzere Vertragsbeziehungen zu Subunternehmern und Lieferanten (gegenseitige Schnittstellenoptimierung ist relativ schwierig)
 - usw.

Mit den Begrifflichkeiten der Logistik (vgl. (Fleischmann 2008)) ist die Ursache von Verschwendung in einer Produktion die unter den jeweiligen exogenen (äußeren) und endogenen (inneren) Einflussfaktoren⁷⁵ gewählte Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Die Verschwendung resultiert aus den Konsequenzen der Umsetzung der PPS, eine optimale PPS führt zu minimaler (bzw. keiner) Verschwendung.

Die Erkenntnis, dass eine Ursache von Verschwendung die PPS der jeweiligen Produktion ist, ist zunächst paradox, da das eigentliche Ziel der PPS eine möglichst optimale Produktion ist. Die ursprüngliche Ursache für Verschwendung innerhalb der PPS ist allerdings ein Komplexitätsproblem. Damit die PPS realisierbar ist (sowohl aus ökonomischer Sicht als auch aus der Sichtweise der kognitiven Fähigkeit der beteiligten Personen⁷⁶) sind Vereinfachungen notwendig. Diese

⁷³ Eine ausführlichere Gegenüberstellung ist in (Börkircher 2011) zu finden.

⁷⁴ Zumindest mittelfristig.

⁷⁵ vgl. Kapitel 3.1.

⁷⁶ Ab einem gewissen Komplexitätsgrad sind Vereinfachungen unausweichlich, um eine Überforderung zu verhindern. Man möge sich vorstellen ein Modell (die PPS basiert letztlich auf einer Modellvorstellung) wäre dazu in der Lage, die Realität komplett wiederzugeben und würde damit alle möglichen Einflussfaktoren berücksichtigen, so wäre es gleichzeitig nicht anwendbar, da die Lösung entweder viel zu lange dauern würde oder (und dies ist wahrscheinlicher) das Modell unlösbar wäre.

Vereinfachungen führen dazu, dass bestimmte Sachverhalte durch die Planungs- und Steuerungsmechanismen fokussiert und andere wiederum komplett vernachlässigt werden⁷⁷.

Des Weiteren sind die Ziele einer verschwendungsarmen Produktion interdependent und teilweise auch gegensätzlich. Die Bestimmung geeigneter Zielparameter⁷⁸ ist somit sehr schwierig. Dies soll durch ein kurzes Beispiel erläutert werden:

- Das theoretische Ziel von Lean Management ist der sog. One-Piece-Flow. Wie allerdings leicht nachvollziehbar existieren auch nicht komplett eliminierbare Varianzen in Prozessabläufen⁷⁹. Die Einführung des One-Piece-Flows würde somit selbst bei theoretisch optimalen Prozessabläufen die Auslastung der Produktion verringern (da die Prozessdauern schwanken, kann es vorkommen, dass ein Prozess auf dessen Vorgänger - oder Nachfolger - warten muss). Eine verringerte Auslastung kann in diesem Fall - da die Prozesse theoretisch nicht weiter optimiert werden können - als Verschwendung von Ressourcen interpretiert werden⁸⁰.

Der wesentlichste Grund dafür, dass das PPS einer Produktion selbst Ursache von Verschwendung ist, resultiert allerdings aus der Dynamik der Realität. Bereits bei der Planung des PPS sind Annahmen notwendig, die sich nicht immer als korrekt herausstellen, was zu Änderungen innerhalb der PPS führt. Diese erwähnten Annahmen werden bei jeder Versionierung des PPS getroffen und selbst wenn diese für einen bestimmten Zeitraum zutreffen, muss dies keinesfalls für die Ewigkeit gelten. Die Umwelt des Unternehmens und das Unternehmen selbst befinden sich in einem ständigen Wandel, so dass alleine aus diesem Grund eine Anpassung zu bestimmten Zeitpunkten notwendig wird. Der Grund für notwendige Anpassungen kann letztlich auf die existierenden endogenen und exogenen Einflussfaktoren zurückgeführt werden.

Während endogene Einflussfaktoren (wie z.B. Arbeitsmotivation innerhalb der Produktion und Ausfallwahrscheinlichkeit) durch bestimmte Maßnahmen direkt beeinflusst werden können, entziehen sich exogene Einflüsse meist der direkten Beeinflussbarkeit (wie z.B. Marktsituation, Witterung und Bürgerbegehren). Zudem können die Auswirkungen von negativen Einflüssen meist nur verringert werden - insofern dies ökonomisch sinnvoll und möglich ist⁸¹.

Endogene und exogene Einflussfaktoren verursachen Verschwendung innerhalb der Produktionsprozesse. Einflüsse führen aufgrund ihrer Dynamik letztlich zu Schwankungen innerhalb von Prozesszeiten und damit zu Verschwendung. Einflüsse sind zeitlich veränderlich, d.h. nicht konstant⁸². Die zeitliche Abhängigkeit resultiert wiederum aus den Abhängigkeiten der Einflüsse, ein plakatives Beispiel soll dies verdeutlichen:

⁷⁷ Dies ist gleichzeitig eine Anforderung an ein Modell. Jedes Modell soll nur so komplex wie nötig sein, also möglichst einfach (vgl. (Springer 2012)).

⁷⁸ Unberücksichtigt davon, dass Ziele subjektiver Natur sind. Jeder Akteur hat andere Ziele oder zumindest eine andere Gewichtung derselben.

⁷⁹ Man möge sich vorstellen eine Arbeitskraft führt eine Tätigkeit n-mal aus. Die Ausführungsdauer wird für jede Ausführung festgehalten. Das Ergebnis ist eine Dichtefunktion, die eine gewisse Varianz aufweist. Ein Grund dafür ist z.B., dass Arbeitsaufgaben unter unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden oder die Arbeitsinhalte nicht komplett identisch sind.

⁸⁰ Die Lösung wäre die Einrichtung von Puffern.

⁸¹ Ähnliches gilt für positive Einflüsse, diese können nur bis zu einem gewissen Grad verstärkt werden.

⁸² Dies kann zumindest für die meisten Fälle angenommen werden. Wären Einflüsse hingegen statisch, so könnte ein Produktionssystem so ausgelegt werden, dass es die Einflüsse beseitigt oder deren Wirkung verringert werden. Zumindest im ersten Fall würde die hieraus resultierende Varianz entfallen.

- z.B. hängt die Witterung von der Entwicklung von Hoch- und Tiefdruckgebieten ab, diese wiederum von der Entwicklung der Temperatur und diese von der Distanz zwischen Erde und Sonne sowie der Aktivität der Sonne ...

Neben den reinen Schwankungen der Prozesszeiten existieren Schwankungen (maßgeblich bedingt durch exogene Einflüsse) in der Auftragsakquisition, was insbesondere bei engineer-to-order und make-to-order⁸³ Produktionsprozessen zu Verschwendung führt.

⁸³ Für eine genaue Erläuterung der Begrifflichkeiten siehe (Schuh et al. 2006).

3 Generische Modellierung der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung im schweren Erdbau⁸⁴

Im Folgenden wird ein generisches Modell der Bauproduktionsplanung und -steuerung für den schweren Erdbau vorgestellt. Das Modell stellt die für diese Arbeit gültigen Zusammenhänge des schweren Erdbaus (bzw. der Bauproduktion im Allgemeinen) dar und bildet somit eine theoretische Grundlage für weitere Überlegungen.

Wie in allen Produktionen wird auch im Erdbau während der Planungsphase ein Soll-Ablauf definiert. Da die in die Zukunft gerichtete Planung, die später während der Ausführung auftretenden Randbedingungen prognostiziert, stimmen die während der Ausführung tatsächlich angetroffenen Randbedingungen nur selten mit den in der Bauproduktionsplanung angenommen Randbedingungen überein. Hieraus resultiert die Notwendigkeit einer gezielten Bauproduktionssteuerung, um Planung und Realität in Einklang zu bringen.

Sowohl der Bauproduktionsplanung als auch der Bauproduktionssteuerung liegen die Ziele der kostenmäßigen und terminlichen Optimierung des Wertschöpfungsprozesses unter den vom Bauherrn vorgegebenen Qualitätsanforderungen zu Grunde.

Im ersten Unterkapitel (vgl. 3.1) wird erläutert, was momentan unter Bauproduktion verstanden wird und aus welchen Elementen ein Bauproduktionssystem im Erdbau besteht. Das zweite Unterkapitel (vgl. Kapitel 3.2) stellt den aktuellen Stand der Bauproduktionsplanung im Erdbau dar. Im dritten Unterkapitel (vgl. Kapitel 3.3) wird erläutert, wie durch Bauproduktionssteuerung versucht wird, die Ziele des Erdbaus zu erreichen. Mit Hilfe von mathematischer Modellierung wird die Bauproduktionsplanung und -steuerung qualitativ und in wesentlichen Teilen auch quantitativ dargestellt, um Handlungen im Erdbau besser verstehen zu können und Verbesserungsmöglichkeiten anzudeuten.

3.1 Bauproduktion als Wertschöpfungsprozess

Aus systemtechnischer Sicht besteht eine Baustelle (wie alle Produktionen) aus drei Hauptkomponenten: dem Input⁸⁵, dem Produktionsprozess bzw. den einzelnen Arbeitssystemen und dem Output⁸⁶. Auf den Produktionsprozess wirken unterschiedlichste Einflussgrößen, die den Output beeinflussen.

Günther und Tempelmeier definieren 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“ (Günther & Tempelmeier 2009)

Ein **Produktionssystem** (vgl. Abbildung 3-1) setzt sich aus einzelnen Abschnitten zusammen, die jeweils einen bestimmten Teil der Produktion eines Erzeugnisses abdecken. Diese Abschnitte sind nach

⁸⁴ Dieses Kapitel wurde teilweise bereits in (Bregenhorn & Gentes 2012) und insbesondere in (Bregenhorn 2013) publiziert.

⁸⁵ Dies sind Vorleistungen, die zur Durchführung eines Arbeitsschrittes notwendig sind, d.h. die Ergebnisse der vorherigen Arbeitsschritte (z.B. die Herstellung eines bestimmten Zustandes wie „Mutterboden ist abgetragen“, aber auch Informationen, Pläne etc.).

⁸⁶ vgl. Kapitel 2.5.1. Output sind in diesem Zusammenhang z.B. Zwischenzustände (z.B. „Planum ist in einem Bereich erstellt“), Pläne und Informationen.

Möglichkeit so zu organisieren, dass ein gleichmäßiger und verschwendungsarmer⁸⁷ Arbeitsfluss⁸⁸ entsteht. Die kleinste selbstständig arbeitsfähige Einheit, die jeweils einen einzelnen Abschnitt eines Produktionsprozesses ausführt, wird nach Günther und Tempelmeier als Arbeitssystem bezeichnet (vgl. (Günther & Tempelmeier 2009)).

⁸⁷ Zur Definition von Verschwendung siehe Kapitel 2.2.2.

⁸⁸ vgl. Kapitel 2.5.2.

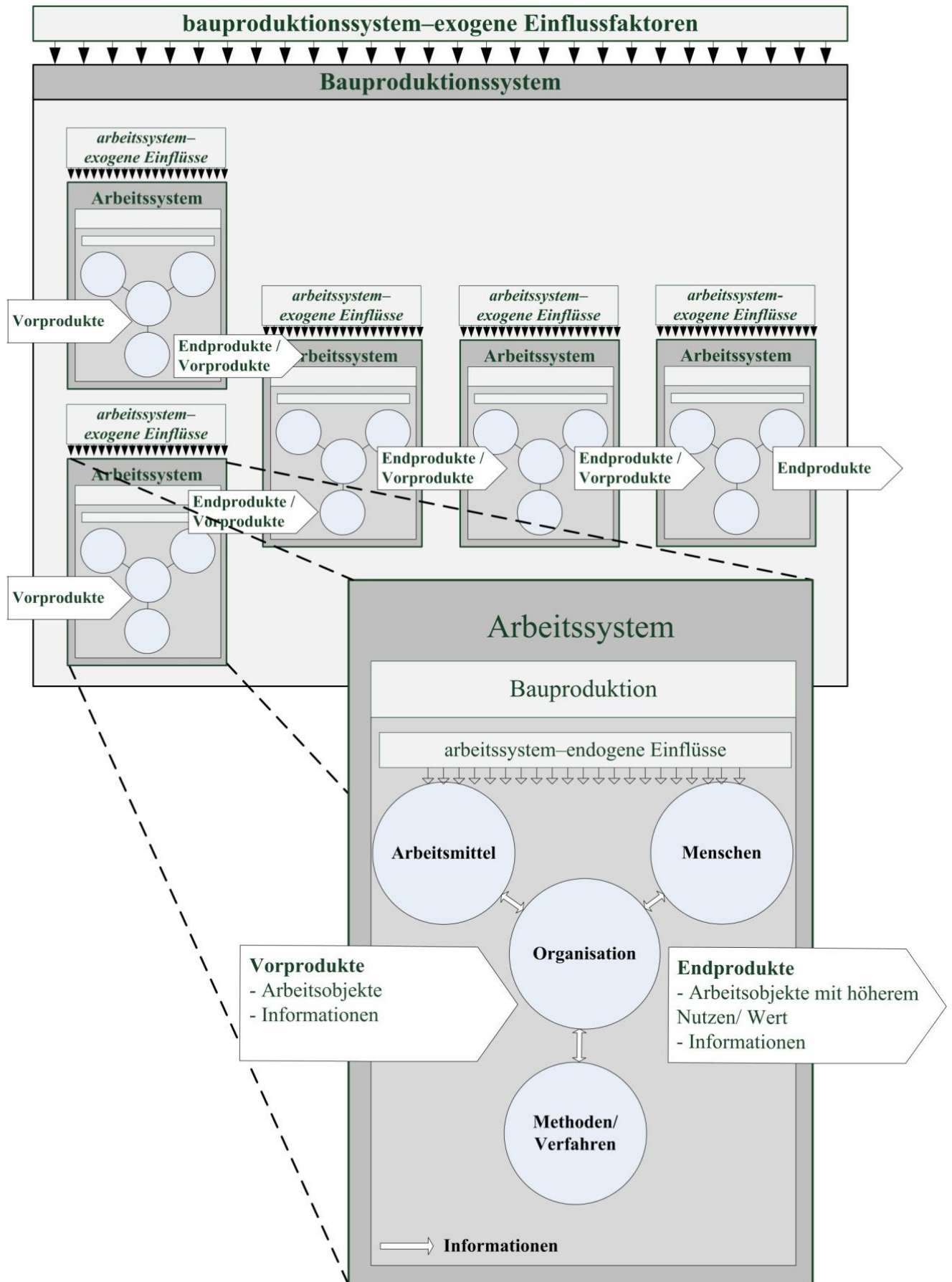


Abbildung 3-1: Das Bauproduktionssystem

Damit ein **Arbeitssystem**⁸⁹ tätig werden kann, benötigt es Vorprodukte (Input). Innerhalb der Arbeitssysteme werden die Produktionsfaktoren so miteinander verknüpft, dass am 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. Die Produktion wird während des Wertschöpfungsprozesses von äußeren (exogenen) und inneren (endogenen) Einflüssen beeinträchtigt.

Ein Arbeitssystem kann aus einer oder mehreren **Arbeitsstationen**⁹⁰ bestehen. Die Arbeitsstationen werden bei der Bearbeitung der Arbeitsobjekte durchlaufen. Je nach Aufgabenstellung sind mehr oder weniger Arbeitsstationen am Produktionsprozess beteiligt. Abbildung 3-2 zeigt eine schematische Darstellung. Die nummerierten Rechtecke stellen Arbeitsstationen dar, die während der Produktion durchlaufen werden. Die Dreiecke stellen Pufferbestände zwischen den Arbeitsstationen dar. Eine Arbeitsstation repräsentiert einen Arbeitsschritt, der aus einer bestimmten Kombination von Bauproduktionsfaktoren besteht.

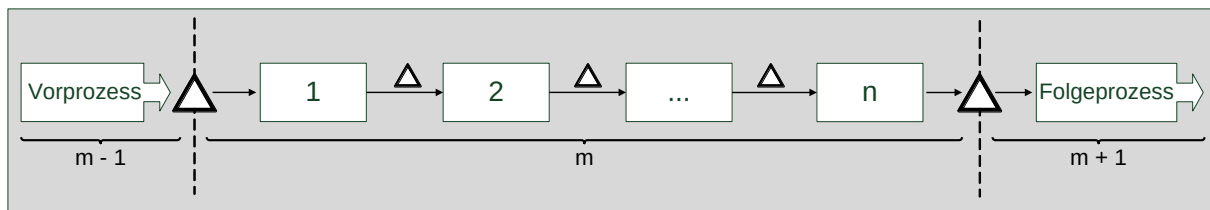


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Arbeitsstationen des Arbeitssystems „m“⁹¹

Überträgt man diese aus der stationären Industrie stammende Definition auf das Bauwesen, so kann Bauproduktion⁹² 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 Nutzen/ Wert möglichst ökonomisch zu generieren.**

3.1.1 Bauproduktionsfaktoren

Unter **Produktionsfaktoren** werden diejenigen - immateriellen und materiellen - Gegenstände verstanden, die ein Produktionsprozess benötigt, um Arbeitsleistung zu erbringen. Die

⁸⁹ Eine ausführlichere Darstellung ist in (REFA 1986) zu finden.

⁹⁰ Der Begriff Arbeitsstation wird eingefügt, da ihm im Vergleich zum Arbeitssystem ein anderer Gedankengang zugrundeliegt. Während das Arbeitssystem die systematische Sicht fokussiert (Transformationssicht), fokussiert der Begriff Arbeitsstation die Sichtweise des Ablaufs (Flussicht). Der Ablauf in der Produktion ist durch dessen Material- und Informationsflüsse gekennzeichnet.

⁹¹ Diese Darstellung orientiert sich an der Wertstromanalyse vgl. z.B. (Rother & Shook 2004) oder (Erlach 2007). Des Weiteren handelt es sich um die Darstellung des physischen Materialflusses, die zugehörigen Informationen sind nicht grafisch dargestellt. Innerhalb der Arbeitsstationen und insbesondere an den Schnittstellen zwischen Arbeitssystemen ist ein zu den Aufgaben zugehöriger Informationsaustausch notwendig.

⁹² Girmscheid stellt eine ausführliche Definition der Bauproduktionstheorie in (Girmscheid 2007a),(Girmscheid 2007d) und (Girmscheid 2008a) vor. Eine weitere Darstellung ist in (Koskela 2000) zu finden.

Produktionsfaktoren werden je nach Quelle unterschiedlich unterteilt⁹³, das Gesamtverständnis der Begrifflichkeit stimmt jedoch weitestgehend überein⁹⁴.

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

Abbildung 3-3: Die Bauproduktionsfaktoren⁹⁵

Aus Sicht eines Arbeitssystems werden die Bauproduktionsfaktoren „Vorprodukte und Informationen⁹⁶“ von außen bezogen, während die restlichen Bauproduktionsfaktoren Teil des Arbeitssystems selbst sind. Grundsätzlich können die Produktionsfaktoren in **materielle und immaterielle Bauproduktionsfaktoren** unterteilt werden.

Zu den materiellen Bauproduktionsfaktoren gehören Arbeitsmittel, Material, Infrastruktur, Arbeitsraum und der Mensch.

Unter **Arbeitsmittel** werden alle für die Produktion notwendigen physischen Elemente verstanden, die stofflich nicht direkt in das jeweilige Endprodukt eingehen, jedoch bei Erstellung abgenutzt oder verbraucht werden. Hierzu gehören im Bauwesen insbesondere die Baumaschinen inklusive der notwendigen Betriebsstoffe (z.B. elektrische Energie, Diesel und Schmierstoffe) und die Schalung. Des Weiteren sind die Bauhilfsstoffe hierunter einzugliedern.

Arbeitsobjekte gehen stofflich direkt in das Endprodukt ein⁹⁷. Zu den Arbeitsobjekten gehören die Baustoffe und Zwischenprodukte. Baustoff ist im schweren Erdbau insbesondere das anstehende und von außen hinzugezogene Bodenmaterial. Gegenüber den Baustoffen werden die Zwischenprodukte abgegrenzt, hierunter fallen alle Produkte, die einer höheren Fertigungsstufe angehören⁹⁸. Die Zwischenprodukte lassen sich weiter aufteilen in - vorgefertigte und auf die Baustelle gelieferte - Fertigteile (z.B. Lärmschutzwände) und auf der Baustelle erstellte Zwischenstadien des Endproduktes, z.B. ist die Erstellung eines Dammes (Einbau) oder Einschnitts (Abtrag) ein Vorprodukt für die anschließende Herstellung der Frostschutzschicht.

⁹³ vgl. (Gutenberg 1970), (DIN EN ISO 6385 2004), (Deml 2008), (Ott 2007), (Martin et al. 2011), (Pachow-Frauenhofer et al. 2008), (T. Heinen 2008) und (E. Heinen 1991).

⁹⁴ Auf das Bauwesen abgestimmte Definitionen sind in (Chong et al. 2011), (Deml 2008), (Ott 2007) und (Bauer 2006) zu finden.

⁹⁵ Diese Darstellung orientiert sich an (Günther & Tempelmeier 2009) und verbindet sie mit der klassischen Definition nach (Gutenberg 1970).

⁹⁶ Informationen sind ständiger Begleiter der Bauproduktion.

⁹⁷ In einem Abtragbereich geht das Arbeitsobjekt „Grund und Boden“ in die Arbeitsstation „Abtragen“ als Input ein. Wobei sich real die Arbeitsstation zum Arbeitsobjekt bewegt, dies ist allerdings nicht immer der Fall z.B. im Einbaubereich findet eine Kombination statt (das Material bewegt sich per LKW zum Einbaubereich und die Planierdrape bewegt sich zum Entladungspunkt der LKW). „Grund und Boden“ ist in diesem Zusammenhang mehr als nur das abzutragende Material, sondern insbesondere auch das für das Planum verbleibende Bodenmaterial.

⁹⁸ Unter einer höheren Fertigungsstufe ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass diese Elemente weitestgehend in ihrer ursprünglichen Form in das Endprodukt eingehen.

Infrastruktur bzw. Arbeitsraum ist notwendig, damit produziert werden kann. Das Bauwesen nimmt hierbei eine Sonderstellung ein, da die Infrastruktur/der Arbeitsraum häufig Teil des zu erstellenden Produktes ist⁹⁹.

Der **Mensch** ist die wesentliche Ressource einer Produktion¹⁰⁰. Er wendet die übrigen Produktionsfaktoren so an, dass Arbeitsobjekte in Objekte mit höherem Nutzen/Wert umgewandelt werden.

Neben den materiellen Bauproduktionsfaktoren gibt es Produktionsfaktoren, die durch keinen direkten physischen Gegenstand repräsentiert werden. Diese Produktionsfaktoren werden im Folgenden immaterielle Produktionsfaktoren genannt. Zu den immateriellen Produktionsfaktoren gehören Organisation, Informationen und Methoden/ Verfahren.

Damit ein zielorientierter Wertschöpfungsprozess entsteht, bedarf es der **Organisation**. Die Organisation umfasst neben den klassischen Definitionen wie Aufbau- und Ablauforganisation auch die Planung und Steuerung der Prozesse. Das Bauwesen ist stark durch dynamische Kooperationsnetzwerke gekennzeichnet. Im Gegensatz zur stationären Industrie, in der häufig längerfristige Zusammenarbeiten zwischen den einzelnen Akteuren entstehen, sind diese im Bauwesen aufgrund der Projektdauern meist auf kurz- bis mittelfristige Zusammenarbeiten begrenzt¹⁰¹. Dies führt zu einem erhöhten Koordinierungsaufwand.

Informationen nehmen im Wertschöpfungsprozess eine sehr wichtige Position ein. Fließen keine Informationen, kann auf die in der Produktion existierenden Chancen und Risiken nicht angemessen reagiert werden¹⁰². Beispiele für Informationen sind Plandaten (Soll-Daten) und Daten, die den momentanen Systemzustand beschreiben (Ist-Daten). Informationen begleiten den gesamten Wertschöpfungsprozess, sie können als Vorprodukt von außen in das Arbeitssystem, im Inneren des Arbeitssystems und als Ergebnis in das nachfolgende Arbeitssystem fließen.

Unter **Methoden und Verfahren** ist auf der einen Seite das Wissen bzw. die Kenntnis eines bestimmten Produktionsverfahrens zu verstehen. Auf der anderen Seite fallen hierunter aber auch spezielle Recht, Lizenzen und Patente.

Aufgrund der Dynamik der Auftragsstruktur des Bauwesens wird im Gegensatz zur stationären Industrie in den meisten Fällen keine (absolut) 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. Die Entscheidung, wann eine neue Investition getätigt wird, muss auf Basis einer detaillierten Kalkulation¹⁰³ getroffen werden.¹⁰⁴

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

⁹⁹ z.B. finden bei der Erstellung eines Einschnitts die Arbeiten direkt auf dem zu erstellenden Produkt statt.

¹⁰⁰ Angenommen wird an dieser Stelle, dass es sich um keine Arbeitssysteme handelt, die komplett von Maschinen übernommen werden können. Gerade im Bauwesen ist der Mensch aufgrund des Unikatcharakters ein wesentliches Element der Wertschöpfung.

¹⁰¹ Dies wird auch durch den Gesetzgeber forciert z.B. bei Vergabe nach VOB Teil A (vgl. (Durkheim et al. 2010)) und entsprechender Losbildung.

¹⁰² In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung des Informationsflusses stark (im Zusammenhang mit der Entwicklung des PC und des Internets) zugenommen. Unternehmen wie z.B. SAP und Oracle haben sich mit großem Erfolg auf die Verbesserung des Informationsflusses spezialisiert.

¹⁰³ Neben der reinen Kostenbetrachtung ist es notwendig weitere Faktoren wie z.B. Flexibilität zu bewerten.

¹⁰⁴ vgl. (Kühn 1984), (Girmscheid 2008c) und (Girmscheid 2008b).

Hauptursachen für eine Beeinflussung der Verfügbarkeit der Bauproduktionsfaktoren sind jedoch die exogenen und endogenen Einflüsse des Bauproduktionssystems. Diese Einflüsse sind ebenfalls der Grund dafür, dass Bauproduktionsfaktoren anders - insbesondere bzgl. des Faktors Zeit - als ursprünglich in der Planung vorgesehen eingesetzt werden.

Die Auswahl der eingesetzten Bauproduktionsfaktoren und die zugehörige umgesetzte Koordination bestimmen im Zusammenhang mit den von außen auf das System wirkenden Einflüssen die erreichte Gesamtproduktivität des Systems. Des Weiteren hängt die erreichte Gesamtproduktivität auch vom Funktionieren der existierenden Schnittstellen ab.^{105 106}

3.1.2 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 Abbildung 3-4 ist die Einteilung der genannten Einflüsse abgebildet¹⁰⁷.

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

Abbildung 3-4: Kategorisierung der Einflüsse, die auf ein Bauproduktionssystem wirken

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 Faktoren¹⁰⁸, sowie der Weiterentwicklung von Methoden, Verfahren und Technologien resultieren.¹⁰⁹

Da der Hauptauftraggeber von Infrastrukturbaumaßnahmen die öffentliche Hand ist¹¹⁰, sind beispielsweise konjunkturelle Investitionsmaßnahmen des Staates von sehr großer Bedeutung¹¹¹. 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.

¹⁰⁵ vgl. (Schütz & Hofstadler 2012).

¹⁰⁶ Börkircher schreibt zu den Gründen für auftretende Probleme im Bauwesen: „Probleme können vor allem auf die Komplexität der Abläufe zurückgeführt werden, die neben den wechselnden (dynamischen) Randbedingungen durch voneinander abhängige Abläufe, unscharfe Zielvorgaben und eine große Anzahl selbstständiger Vertragspartner verursacht wird.“ (Börkircher 2011).

¹⁰⁷ Börkircher schreibt hierzu im Zusammenhang mit Bauablaufstörungen, die als Folge von negativen Einflüssen gesehen werden können: „Betriebliche Störungen können allgemein in externe, das heißt solche, die auf natürliche, staatliche oder marktwirtschaftliche Ereignisse zurückzuführen sind, und in interne (systemimmanente) Störungen eingeteilt werden. Letztere ergeben sich aus dem (aktuellen) Bauablauf heraus...“ (Börkircher 2011).

¹⁰⁸ z.B. demographische Entwicklungen und Gesetzesregelungen.

¹⁰⁹ vgl. (Pachow-Frauenhofer et al. 2008).

¹¹⁰ vgl. (Baumgärtel et al. 2011). Dem gegenüber ist ein Trend zu privaten Betreibermodellen festzustellen (sog. PPP-Projekte).

¹¹¹ Die Investitionsmöglichkeiten des Staates hängen wiederum von den Steuereinnahmen und damit von der ökonomischen Situation des Landes ab (vgl. (Muschel 2012)).

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

Die einzelnen Unternehmen haben allerdings nur sehr begrenzten Einfluss auf die produktionssystem - exogenen Einflüsse¹¹², 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.

Die **produktionssystem-endogenen Einflüsse** resultieren aus den Produktionsfaktoren und ihrem Zusammenspiel. Die produktionssystem-endogenen Einflüsse lassen sich 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 thematisiert¹¹³. Eine exemplarische Zusammenstellung der Einflüsse ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

Die Bauproduktion wird unter der Berücksichtigung bestimmter Einflüsse geplant. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System sich wie in der Planung angenommen verhält, sehr gering¹¹⁴. Insbesondere der Erdbau ist in seiner betrieblichen Ausprägung „unstabil“¹¹⁵. Treten andere Einflüsse als in der Planung berücksichtigt auf oder ist deren Auswirkung nicht identisch mit den in der Planung getroffenen Annahmen, entstehen Abweichungen zur ursprünglichen Planung.

Einflüsse führen aufgrund von Unkenntnis der Ausprägung der Auswirkungen letztlich zu Unsicherheiten über Systemzustände. Die Unsicherheiten ihrerseits führen dazu, dass im Bauwesen deutliche Puffer eingeplant werden¹¹⁶.

Zielabweichungen bedeuten in der baubetrieblichen Praxis insbesondere Abweichungen von geplanten Kosten, Terminen und Qualitäten. Die Ursachen von Zielabweichungen liegen häufig in der (bedingt durch die in Abbildung 3-4 benannten Einflüsse) schwankenden Leistungsfähigkeit der in einem Netzwerk arbeitenden Bauproduktionsfaktoren¹¹⁷. Hierbei gilt, dass eine Gruppe von Bauproduktionsfaktoren nur so stark sein kann, wie das schwächste Mitglied¹¹⁸. In Abbildung 3-6 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

¹¹² z.B. Bildung von Verbänden, die gezielt Interessen gegenüber der Politik vertreten.

¹¹³ Vgl. (Kühn 1984), (Gehbauer 1974), (Knaupe 1977), (Hüster 2005), (Eymer et al. 2007), (Caterpillar 2007), (Bauer 2006), (Girmscheid 2010c) und (Gehbauer 2004).

¹¹⁴ vgl. (Gehbauer 1974), (Kühn 1984), (Bauer 2006) und (Hüster 2005).

¹¹⁵ vgl. (Kühn 1984).

¹¹⁶ Zu den Zusammenhängen zwischen Unsicherheiten und Puffern siehe z.B. (Koskela 2000).

¹¹⁷ Dies gilt überwiegend bei Termin- und Kostenabweichungen, gilt aber auch für Qualitätsabweichungen, da Qualität wiederum von der verfügbaren Produktionsdauer und dem damit verbundenen verfügbaren Kostenbudget abhängt.

¹¹⁸ vgl. (Goldratt & Cox 2004).

3 Generische Modellierung der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung im schweren Erdbau

die Auswirkungen der negativen Zielabweichungen möglichst gering zu halten und andererseits das Potential von positiven Zielabweichungen möglichst optimal ausschöpfen zu können.

Einflüsse auf das Bauproduktionssystem		
produktionssystem - endogene Einflüsse	arbeitssystem - endogene Einflüsse	- Planunterlagen (Genauigkeit, Aktualität usw.) - Arbeitsvorbereitung - Organisation (Aufbau- und Ablauforganisation) - Steuerung (Steuerungsintervalle, Steuerungsmethoden usw.) - Logistik innerhalb des Arbeitssystems (Anordnung der Produktion, Transportwege, Lagerhaltung, Pufferauslegung usw.) - Sequenzierung des Produktionsprozesses - Ressourcenallokation innerhalb des Arbeitssystems - Qualifizierung der Mitarbeiter - Motivation der Mitarbeiter - Einbindung der Mitarbeiter - Baumaschinen - Arbeitswerkzeuge - Instandhaltung - Verschleiß - Energieversorgung
	arbeitssystem - exogene (aber Produktionssystem endogene) Einflüsse	- Planung - Arbeitsvorbereitung - Steuerung (Steuerungsintervalle, Steuerungsmethoden usw.) - Organisation - Logistik innerhalb der Produktion (Auslegung der Puffer, Beschaffung von Arbeitsmitteln und Arbeitsobjekten usw.) - Informationssysteme - Sequenzierung der Arbeitssysteme - Ressourcenallokation - Leistungsfähigkeit der Arbeitssysteme - Qualität der Arbeitssysteme - Termineinhaltung der Arbeitssysteme - Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen (Schnittstellenmanagement) - Beanspruchung der Infrastruktur (Flächenmanagement) - Methoden zur kontinuierlichen Verbesserung - Auslastung
produktionssystem - exogene Einflüsse	Natürliche Umwelt	- Niederschlag - Bodenmaterial (Bodenfeuchtigkeit, Bodenverdichtbarkeit, Sieblinie, Bodenart usw.) - Temperatur - Vegetation - Wind
	Technologische Entwicklungen	- Antriebstechnologien - Sensorik - Arbeitswerkzeuge - Baumaschinen allgemein - Informationstechnologien - usw.
	Entwicklung von Methoden/Verfahren	- Bauverfahren - Methoden zur Personalführung - Methoden zur Projektplanung und -steuerung - Last Planner System - usw.
	Soziale/ politische Faktoren	- Demographische Entwicklung - Entwicklung der Gesetzgebung - Konjunkturmaßnahmen - Naturschutz - usw.
	Ökonomie	- Entwicklung der Bauwirtschaft - Entwicklung des Kreditmarktes - Entwicklung des Marktes der Lieferanten und Kunden - usw.

Abbildung 3-5: Einflussfaktoren der Bauproduktion

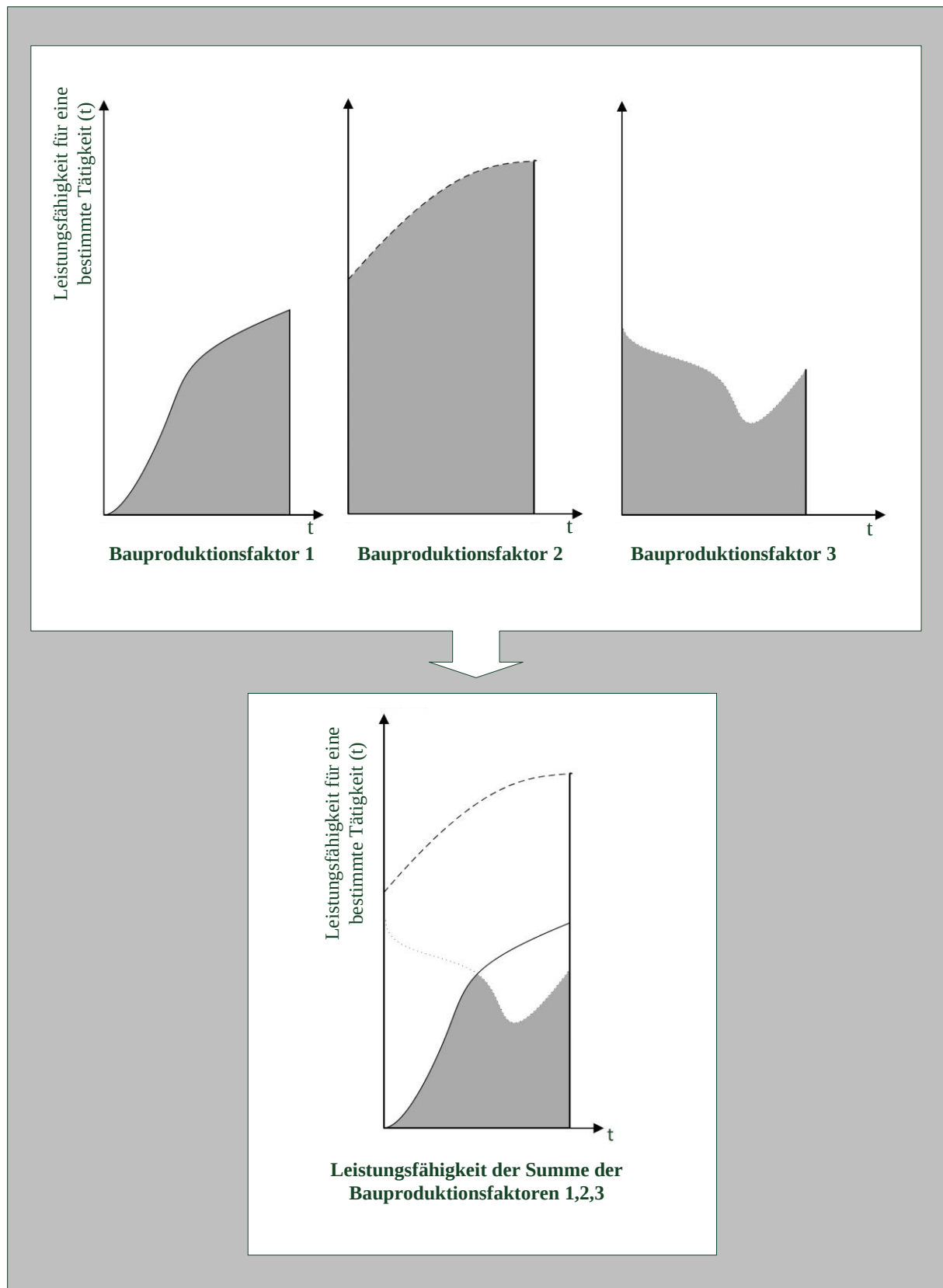


Abbildung 3-6: Kontinuierliche Darstellung der Leistungsfähigkeit der Bauproduktionsfaktoren¹¹⁹

¹¹⁹ Hierbei wird angenommen, dass eine direkte Abhängigkeit zwischen den Bauproduktionsfaktoren besteht.

3.2 Bauproduktionsplanung

Ein wesentlicher Teil der Bauproduktionsplanung ist die Festlegung des Bausolls. Klassisch erfolgt die Planung des Bausolls im Infrastrukturbereich aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen meist losgelöst von dem späteren Ablauf der Ausführung. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Bauproduktionsplanung in dieser Arbeit auf der Ausführungsplanung (d.h. das Bausoll ist gegeben und der Ablauf der Ausführung ist bis zu einem gewissen Grad flexibel wählbar). Steht die Bauproduktionsplanung, geht es in der Ausführung darum, die geplanten Ziele zu erreichen und bei erkennbaren negativen Abweichungen durch gezielte Steuerungseingriffe diese einzudämmen. Eine wichtige Rolle spielt aber auch die Anpassung der Bauproduktionsplanung und -steuerung aufgrund von Änderungen, die unterschiedliche Ursachen haben können (z.B. Änderungswünsche des Bauherren oder mangelnde Planung).

Die Bauproduktionsplanung¹²⁰ übernimmt die End- und Zwischentermine der vertraglichen Rahmenbedingungen des Bauproduktionsauftrags, wählt ein geeignetes Bauverfahren zur Erstellung aus, erstellt einen Terminplan und ermittelt eine vorläufige Bauproduktionsfaktorallokation.

Die Wahl eines Bauverfahrens hat Auswirkungen auf den Terminplan und die Wahl der Bauproduktionsfaktoren. Ein vorgegebener Terminplan¹²¹ wirkt sich wiederum auf die Wahl des Bauverfahrens und die Wahl der Bauproduktionsfaktoren aus. Da Bauunternehmen bestimmte Bauproduktionsfaktoren vorhalten oder nur einen begrenzten Zugang zu externen Bauproduktionsfaktoren besitzen, hat dies Auswirkungen auf die Wahl des Bauverfahrens und den Terminplan. Somit existieren zwischen der Wahl des Bauverfahrens, dem zu erstellenden Terminplan und der Wahl der einzusetzenden Bauproduktionsfaktoren Interdependenzen. Die Erstellung der Bauproduktionsplanung erfolgt des Weiteren unter den Vorgaben bezüglich Kosten und Qualität.

Die Wahl eines geeigneten Bauproduktionsverfahrens inklusive der vorläufigen Bauproduktionsfaktorallokation kann nach Abbildung 3-7 erfolgen.

Im Folgenden werden die einzelnen in Abbildung 3-7 dargestellten Schritte erläutert¹²².

¹²⁰ „Im Bauwesen ist die Arbeitsvorbereitung ein weit verbreiteter und für die (Produktions-) Planung synonym verwendeter Begriff.“ (Börkircher 2011).

¹²¹ Vom Bauherrn werden meist nur Meilensteine vorgegeben, zwischen den Meilensteinen kann das Bauunternehmen den Terminplan unabhängig vom Auftrag gestalten.

¹²² Ausgangslage bildet hierbei insbesondere (Girmscheid 2007a), (Girmscheid 2007d) und (Girmscheid 2008a).

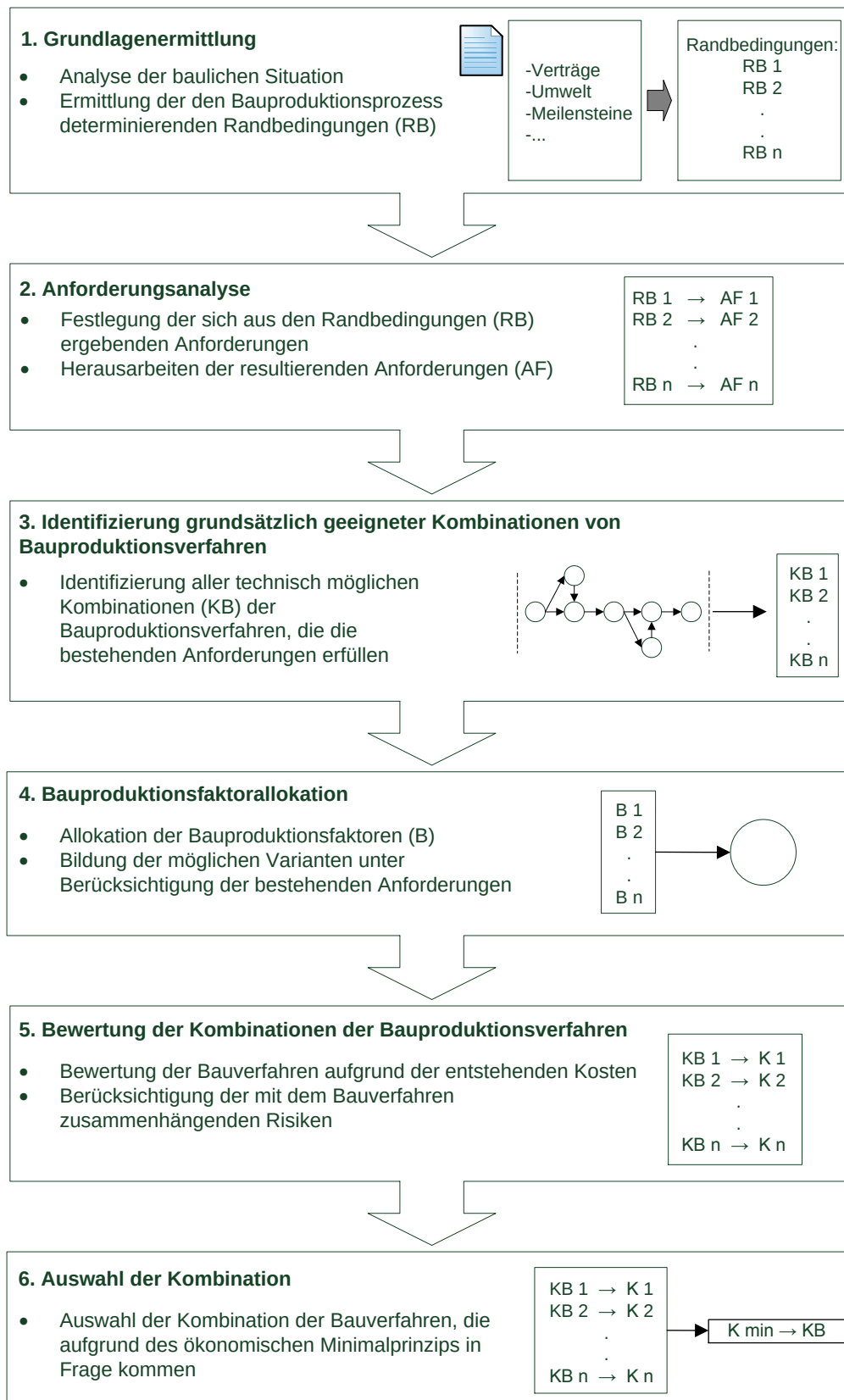


Abbildung 3-7: Ablauf bei der Bestimmung eines Bauverfahrens¹²³

3.2.1 Grundlagenermittlung

Zu Beginn ist eine **Grundlagenermittlung** notwendig, um die Ausgangsbedingungen des jeweiligen Bauprojektes zu identifizieren. Hierzu sind alle relevanten Datenquellen genau zu analysieren. Im Erdbau sind dies insbesondere:

- Ausschreibungsunterlagen
- Bestehende Vertragsunterlagen
- Planunterlagen (2D, 3D)¹²⁴
- Bodengutachten
- Bodenschürfe
- Informationen zu bestehenden Straßenführungen
- Auflagen aus dem Umweltschutz
- Wetterdienste
- Austausch mit Stakeholdern
- Besprechungsprotokolle
- Statusberichte
- Änderungen des Leistungsumfangs
- Abnahmeerklärungen
- Baustellenbegehungen
- Vorschriften zur Arbeitssicherheit

Einen Überblick der wesentlichen zu beachtenden Randbedingungen bietet Abbildung 3-8.

Eine mögliche mathematische Formulierung ist:

$$M_{DQ} = \{DQ_1, \dots, DQ_n\} \quad (3.1)$$

M_{DQ} Menge der Datenquellen des Bauprojektes
 DQ_i Datenquelle i , $i = 1, \dots, n$

Aus einer Datenquelle DQ_i resultieren eine bestimmte Menge an Randbedingungen, $DQ_i \rightarrow M_{RB_i}$.

$$M_{RB_i} = \{RB_{i1}, \dots, RB_{im}\} \quad (3.2)$$

RB_{ij} Randbedingung j , die aus Datenquelle i folgt, wobei $j = 1, \dots, m$

$$M_{RB} = M_{RB_1} \cup \dots \cup M_{RB_n} \quad (3.3)$$

M_{RB} Menge der Randbedingungen des Bauprojekts

¹²³ In Anlehnung an (Girmscheid 2008a). Als Kritik ist zu erwähnen, dass in der Realität der Ablauf nicht so stringent stattfindet wie hier dargestellt, d.h. es bilden sich Schleifen, die dazu führen, dass Schritte mehrfach durchlaufen werden.

¹²⁴ Zukünftig ist außerdem das Building Information Modell (vgl. Kapitel 2.4.7.) als Informationsquelle zu berücksichtigen.

3 Generische Modellierung der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung im schweren Erdbau

Randbedingungen			
Geografische Lage	- Geländegrenzen - Vermessungspunkte, Höhen - Zufahrtswege - Lagerplätze - Ver- und Entsorgungsanschlüsse - Platz für Büro und Unterünfte - Möglichkeit der Personaleinstellung (Qualifizierung, Kosten...)	Erdbewegung	- Massenschwerpunkte - Entfernungen - Förderweiten - Förderrichtungen - Förderwege - Externe Zulieferungen/ Entsorgungen - Platz für Zwischenlager
Geländeform	- Topografie (eben, hügelig, bergig) - Steigung - Gefälle	Wasser	- Grundwasserspiegel - Schwankungen im GW - Hochwasserrisiko - Abfluß (Gefälle/ Gräben) - Vorfluter - Wasserreinigung
Boden	- Bodenart (rollig, bindig, Geröll, Fels...) - Zusammensetzung (Anteil Steine, Schluff...) - Grundwerte (Druckfestigkeit, Scherfestigkeit,...) - Einteilung nach DIN 18300 - Witterungsempfindlichkeit - Erschwernisse (Geröll, Steine, Felsbänke...) - Notwendige Aufbereitung (brechen, sieben...) - Räumliche Schichtverläufe	Oberfläche	- Bewuchs (Grasnarbe, Gestrüpp, Bäume, Wald...) - Natürliche Hindernisse (Täler, Bäche...) - Leitungen (Telefonleitungen, Hochspannungsleitungen...) - Kanalisation - Kampfmittel - Historische Funde
Umwelt	- Hochwassergefahr - Lawinen, Steinschlag - Wildbäche, Muren - Rutschungen	Klima	- Temperaturen (Tag und Nacht) - Luftfeuchtigkeit - Niederschläge - Regen-/Trockenzeiten - Wind, Sturm, Monsun, Taifun
Transportstruktur	- Baustraßennetz - Ausnutzung Gefälle - Umfahrungen (Naturschutzgebiete, Wohngebiete...) - Vorhandene/ anzulegende Wege - Umgelungen während der Bauausführung - Installation von Hilfsbrücken, -dämmen - Wasserableitungen - Staubbekämpfung - Fahrbahnbefestigung - Förderweiten - Steigungen - Aufteilung in Bauabschnitte - Aufteilung in Betriebspunkte - Engpässe (Überholungsmöglichkeiten, Rangiermöglichkeiten, Kurven...)	Baustelleneinrichtung	- Anbindung an Feldwege, Straßen und Baustraßen - Wasserableitung - Grundwasser, Oberflächenwasser, Unwetter - Wasserver-/ Wasserentsorgung - Durchlässe - Bürogebäude/-container - Unterkünfte für Arbeitspersonal - Werkstatt - Sanitäre Anlagen - Waschanlagen - Elektro-Anschluss - Telefon - Internet - Parkplätze - Absperrungen - Bewachung
Gelände-fahrbahn	- Tragfähigkeit - Sümpfe und Mooregebiete - Kraftschluss - Rollwiderstand (Einsinken) - Witterungsempfindlichkeit - Instandhaltung	Fördergut Beschaffenheit	- Geometrie - Konsistenz (schlammig, breiig...) - Schüttdichte - Auflockerungsfaktor
Einbau-/ Abbaustelle	- Arbeitsbedingungen (trocken, nass, feucht, weich, morastig...) - Geometrie (Lagerplatz, Rangiermöglichkeiten...) - Schichtenaufbau - Notwendigkeit von Geotextilen - Bodenverbesserungen (Rüttelstopfsäulen, Bodenaustausch...) - Qualitätskriterien (notwendige Verdichtung, Genauigkeit...)	Projektbeteiligte	- Einzelne Leistungen (Art, Umfang...) - Fälligkeit der Leistungen - Schnittstellenorganisation - IT- Infrastruktur (mögl. einheitlich) - Rechte - Pflichten
Vertragswesen	- Gewährleistung - Unfallverhütungsvorschriften - Absicherung der Risiken - Umweltauflagen - Auflagen bezüglich Betriebszeiten - Vertragsart - Meilensteine/ Zwischentermine - Beschreibung des Bausolls	Planunterlagen (2-D, 3-D...)	- Digitales Bauwerksmodell - Anschlüsse (z. B. an bestehende Bauwerke) - Volumina - Komplexität - Platzverhältnisse

Abbildung 3-8: Ermittlung der Randbedingungen im schweren Erdbau¹²⁵

¹²⁵ vgl. (Bregenhorn 2013).

3.2.2 Anforderungsanalyse

Aus den in der Grundlagenermittlung (vgl. Kapitel 3.2.1) identifizierten Randbedingungen sind die notwendigen Anforderungen an die Bauproduktionsprozesse abzuleiten.

$$M_{RB} = \{RB_{11}, \dots, RB_{nm}\} \quad (3.4)$$

M_{RB} Menge der für das Projekt bestehenden Randbedingungen

RB_{ij} Randbedingung j , die aus Datenquelle i folgt

Aus jeder Randbedingung resultieren bestimmte Anforderungen, d.h. $RB_{ij} \rightarrow M_{AF_{ij}}$.

Die Menge $M_{AF_{ij}}$ ist diejenige Menge an Anforderungen, die aus RB_{ij} resultiert¹²⁶.

$$M_{AF_{ij}} = \{AF_{ij1}, \dots, AF_{ijo}\} \quad (3.5)$$

AF_{ijp} Anforderung p , die aus Randbedingung j und Datenquelle i folgt, $p = 1, \dots, o$

$$M_{AF_i} = M_{AF_{i1}} \cup \dots \cup M_{AF_{im}} \quad (3.6)$$

$$M_{AF} = M_{AF_1} \cup \dots \cup M_{AF_n} \quad (3.7)$$

M_{AF} Menge der Anforderungen des Bauprojekts an die Bauproduktion

Ergebnis ist eine Liste der Anforderungen, die die in Frage kommenden Bauverfahren erfüllen müssen.

3.2.3 Identifizierung der grundsätzlich geeigneten Kombinationen der Bauproduktionsverfahren

Aus den identifizierten Anforderungen können die grundsätzlich geeigneten Kombinationen der Bauproduktionsverfahren identifiziert werden, die zur Erstellung des Bauwerks notwendig sind. Ein Bauprojekt kann, sofern es aus mehreren Teilprojekten besteht, meist nur durch Kombination mehrerer Bauverfahren erstellt werden.

$$M_G = \left\{ \xi \mid (\xi \in \{1, \dots, \bar{\xi}\}) \wedge (\text{für } \xi \text{ gilt } M_{AF} \subseteq M_{E_{BV_\xi}}) \right\} \quad (3.8)$$

M_G Die Menge der aufgrund der Anforderungen grundsätzlich geeigneten technisch möglichen Kombinationen der einzelnen Bauproduktionsverfahren¹²⁷

M_{AF} Menge aller Anforderungen an die Bauproduktionsverfahren

$M_{E_{BV_\xi}}$ Menge der Eigenschaften einer technisch möglichen Kombination ξ der Bauproduktionsverfahren

$$M_{BV_\xi} = \{BV_{\xi 1}, \dots, BV_{\xi \bar{p}}\} \quad (3.9)$$

¹²⁶ Ein simples Beispiel soll dies verdeutlichen: Die verfügbaren Geometrieverhältnisse der Arbeitsplätze haben eine bestimmte Größe (RB). Hieraus wird unter anderem die Anforderung abgeleitet, dass die eingesetzten Baumaschinen eine bestimmte Größe nicht überschreiten dürfen, damit sie ohne Einschränkungen arbeiten können, d.h. $RB_{Geo.} \rightarrow M_{AF_{Geo.}} = \{\dots, \text{Größenbeschränkung der Baumaschinen}, \dots\}$.

¹²⁷ Hierunter fallen auch ggf. für das Projekt neu entwickelte Verfahren.

$M_{BV_{\xi}}$ Menge der Bauproduktionsverfahren in der technisch möglichen Kombination ξ . $\xi \rightarrow M_{BV_{\xi}}$ $\xi = 1, \dots, \bar{\xi}$, $\bar{\xi}$ ist die Anzahl aller möglichen Kombinationen
 $BV_{\xi\psi}$ Bauverfahren ψ in der Kombination ξ , $\psi = 1, \dots, \bar{\psi}$

$M_{BV_{\xi}} \rightarrow M_{E_{BV_{\xi}}}$ jeder Menge $M_{BV_{\xi}}$ ist genau eine Menge $M_{E_{BV_{\xi}}}$ zugeordnet. $M_{E_{BV_{\xi}}}$ ist die Definitionsmenge, die für eine bestimmte technisch mögliche Kombination der Bauproduktionsverfahren alle aus ihr resultierenden Eigenschaften abbildet, d.h.:

$$M_{E_{BV_{\xi}}} = \{\text{Qualitätseigenschaften, Termineigenschaften, ...}\} \quad (3.10)$$

Die Menge der aufgrund der Anforderungen grundsätzlich geeigneten technisch möglichen Kombinationen der einzelnen Bauproduktionsverfahren M_G muss alle an das Projekt gestellten Anforderungen erfüllen.

Falls keine der Bauverfahrenskombination die Anforderungen erfüllt, sind die Anforderungen und Randbedingungen zu überprüfen und evtl. anzupassen. Da die Anforderungen letztlich von dem jeweiligen Bauherren gestellt werden, kann eine Anpassung der Anforderungen nur gemeinsam mit diesem erfolgen¹²⁸.

3.2.4 Bauproduktionsfaktorallokation

Die Bauproduktionsplanung teilt bestimmte Bauproduktionsfaktoren bestimmten Bauproduktionsprozessen zu¹²⁹. Hierzu werden Prognosen über zukünftige Ereignisse getroffen. Der Pool, aus dem die Bauproduktionsfaktoren ausgewählt werden können, ist begrenzt.

Grundsätzlich können die Bauproduktionsfaktoren aus dem eigenen Unternehmen stammen oder von extern hinzugezogen werden¹³⁰.

$$GP = P_{eigen} \cup P_{fremd} \quad (3.11)$$

GP Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren
 P_{eigen} Menge der Produktionsfaktoren aus dem eigenen Unternehmen
 P_{fremd} Menge der Produktionsfaktoren die von außen zugeführt werden

Zunächst ist es notwendig, ein Verständnis für den Bauproduktionsablauf zu erhalten. Verschiedene Bauproduktionshauptprozesse werden geplant, die wiederum eine bestimmte Anzahl an Bauproduktionssubprozessen besitzen. Ein Bauproduktionssubprozess besteht aus mehreren Arbeitsstationen die durchlaufen werden müssen, um ein bestimmtes Produkt herzustellen. Zwischen den einzelnen Produktionsprozessen und Arbeitsstationen entstehen Pufferbestände (vgl. die Dreiecke in Abbildung 3-9), z.B. durch Bildung unterschiedlicher Losgrößen. Die Struktur der Verknüpfung der Arbeitsstationen kann auch deutlich komplizierter sein als in Abbildung 3-9 dargestellt, wenn bspw. ein Netzwerk statt einer Kette vorliegt.

¹²⁸ Kann keine Anpassung der Anforderungen erfolgen, so muss überlegt werden, ob man durch die Beauftragung von Externen die Anforderungen wirtschaftlich erfüllen kann. Zu bedenken bei diesem Vorgehen sind die mit der Beauftragung von Externen einhergehenden Probleme, diese sind insbesondere: Schnittstellenbildung (insb. erschwelter Informationsaustausch), in gewissen Bereichen Verlust an Flexibilität, Verlust der Steuerbarkeit und der ggf. der Verlust von Lerneffekten.

¹²⁹ Gollenbeck-Sunke und Schultmann haben hierzu einen Leitfaden zur Priorisierung der Ressourcenallokation in (Gollenbeck-Sunke & Schultmann 2010) erstellt.

¹³⁰ vgl. (Girmscheid 2007d).

Für die weiteren Darstellungen wird davon ausgegangen, dass die Bauproduktion in Hauptprozesse n und Subprozesse m unterteilt wird. Ein Subprozess kann auf der Ebene der Arbeitsstationen o als Material- und Informationsfluss betrachtet werden (vgl. Abbildung 3-9).

Die Prozessebenen n und m sind exemplarisch gewählt und können leicht um weitere Ebenen ergänzt werden. Die Ebene der Arbeitsstationen o ist in jedem Fall die Ebene, auf der die Material- und Informationsflüsse betrachtet werden können. Eine Arbeitsstation entspricht einer zu verrichtenden Tätigkeit im Erdbau wie z.B. Lösen, Laden, Verteilen, Verdichten oder Transportieren. Es wird vereinfachend angenommen, dass innerhalb der Ebene der Arbeitsstationen nur sequenzielle Abläufe stattfinden¹³¹.

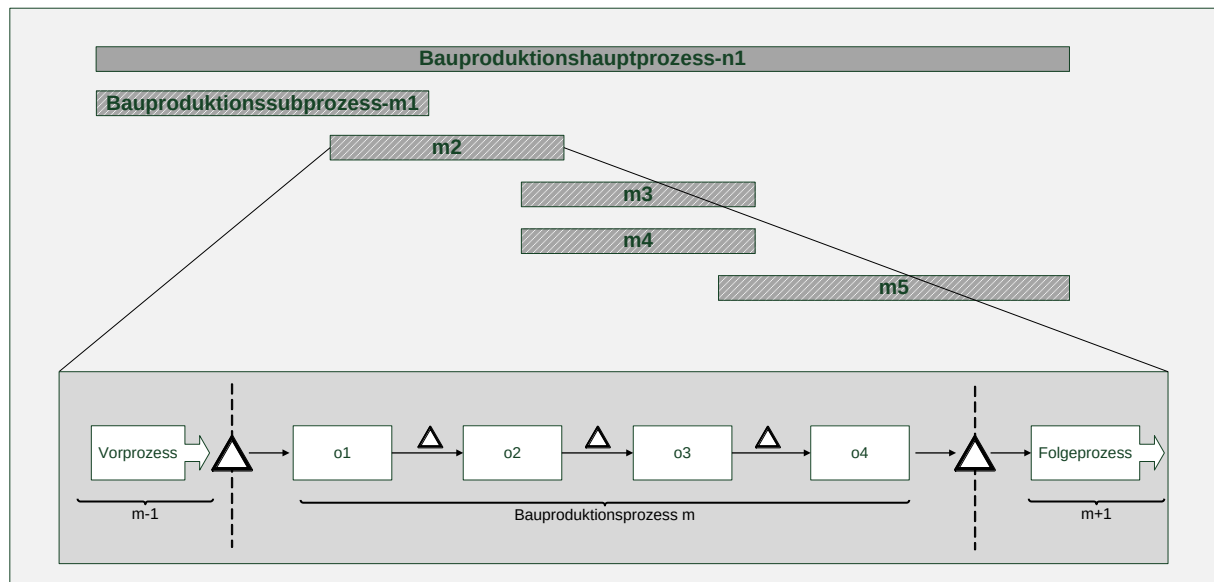


Abbildung 3-9: Zusammenhang zwischen Bauproduktionshaupt-, Bauproduktionssubprozess und Arbeitsstation

Ein Bauproduktionsverfahren besteht aus mehreren Bauproduktionsprozessen¹³². Für jede Variante der Kombinationen der Bauproduktionsverfahren ξ ergeben sich individuelle Haupt- und Subprozesse sowie Arbeitsstationen.¹³³

Für eine bestimmte Arbeitsstation o eines Produktionsprozesses¹³⁴ nm ist derjenige Bauproduktionsfaktor i geeignet, für den gilt:

$$i \in \{GP \cap GPG_{\xi nmo} \cap GPL_{\xi mno} \cap GPV_{\xi mno}\} \quad (3.12)$$

i Bauproduktionsfaktor i

GP Gesamtheit aller Produktionsfaktoren, auf die das Unternehmen zugreifen kann

¹³¹ Dies ist eine erhebliche Vereinfachung. Nicht immer kann davon ausgegangen werden, dass der Ablauf rein sequenziell ist, z.B. bei vorhandenen Schleifen.

¹³² z.B. kann mit einem Bagger-LKW-Betrieb oder einem Scraper-Betrieb das Lösen und Transportieren von Bodenmaterial erfolgen. Je nach gewähltem Verfahren entstehen unterschiedliche Bauproduktionsprozess-abläufe.

¹³³ Die Indexierung ξ wird im Folgenden nur durchgeführt, wenn dies der Autor als sinnvoll erachtet, ansonsten wurde der Übersichtlichkeit halber darauf verzichtet.

¹³⁴ Es wird davon abgesehen den Begriff Prozess scharf zu definieren, da ein Prozess in Abhängigkeit von seiner Art in unterschiedlich viele Hierarchieebenen gegliedert werden kann. Ein Prozess kann z.B. ein Vorhaben, Teilablauf, Ablaufstufe oder Vorgang etc. sein (vgl. hierzu (REFA 1986), (Börkircher 2011), (Girmscheid 2008a) und (VDI 4499 2008)).

$GPG_{\xi nmo}$	<i>Alle für eine Arbeitsstation o grundsätzlich geeigneten Produktionsfaktoren. Grundsätzliche Eignung bedeutet, dass der Produktionsfaktor die mit der jeweiligen Arbeitsstation verbundenen qualitativen, technischen und umweltbedingten Anforderungen erfüllen kann</i>
$GPL_{\xi nmo}$	<i>Gesamtheit aller Produktionsfaktoren i die für eine Arbeitsstation o aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit grundsätzlich geeignet sind</i>
$GPV_{\xi nmo}$	<i>Gesamtheit aller Produktionsfaktoren i, die aufgrund ihrer noch freien Kapazitäten geeignet sind</i> ¹³⁵

$i \in GPG_{\xi nmo}$ gilt, wenn der Bauproduktionsfaktor i die qualitativen, technischen und umweltbedingten Anforderungen der Arbeitsstation o an Bauproduktionsfaktoren erfüllen kann. Dieser Schritt dient der zweiten Ausdifferenzierung der potentiell in Frage kommenden Bauproduktionsfaktoren für eine Arbeitsstation.

$$GPG_{\xi nmo} = \{i \mid \text{für } i \text{ gilt } M_{AF_{\xi nmo}} \subseteq M_{E_i}\} \quad (3.13)$$

$M_{AF_{\xi nmo}}$	<i>Menge der an die Arbeitsstation nmo gestellten qualitativen, technischen und umweltbedingten Anforderungen</i>
M_{E_i}	<i>Menge der qualitativen, technischen und umweltbedingten Eigenschaften von i</i>

$$M_{AF} \rightarrow M_{AF_{\xi nmo}} \quad (3.14)$$

Aus der Menge der bestehenden Anforderungen M_{AF} und der jeweiligen Kombination ξ an Bauverfahren resultieren eine bestimmte Menge an Anforderungen für die einzelnen Arbeitsstationen $M_{AF_{\xi nmo}}$.

$$M_{AF_{\xi nmo}} = \{AF_{\xi nmo 1}, \dots, AF_{\xi nmo \bar{\omega}}\} \quad (3.15)$$

$AF_{\xi nmo \omega}$	<i>Anforderung ω an die Arbeitsstation nmo einer bestimmten Kombination von Bauverfahren ξ¹³⁶, $\omega = 1, \dots, \bar{\omega}$</i>
-----------------------	---

$i \in GPL_{\xi nmo}$ wenn gilt¹³⁷:

$$\sum_{m=1}^{\bar{m}} \vartheta_{n(m-1),nm} \times T_{nm} + t_{w_{n(m-1),nm}} \leq T_{max_n} \quad (3.16)$$

T_{max_n}	<i>Maximale Zeit, die für einen Bauproduktionshauptprozesse n zur Verfügung steht [h]</i> ¹⁴⁰
--------------	--

¹³⁵ Gerade wenn Unternehmen mehrere Bauaufträge gleichzeitig abwickeln kann es vorkommen, dass nicht immer alle Baumaschinen zur Auswahl zur Verfügung stehen.

¹³⁶ Eine Anforderung könnte z.B. die Maßgenauigkeit des Bauverfahrens sein.

¹³⁷ Es wird hierbei davon ausgegangen, dass ein bestimmtes Zeitfenster für einen Bauproduktionshauptprozess oder ein Teil davon vorgegeben ist.

¹³⁸ Hierbei wird davon ausgegangen, dass von den Kunden nur für den Hauptprozess n eine Zeitvorgabe gegeben ist.

¹³⁹ Girmscheid stellt ähnliche Zusammenhänge in (Girmscheid 2006) vor. Er definiert jedoch die Abhängigkeiten über „Anfang-Anfang Beziehungen“ (vgl. Netzplantechnik z.B. (Gehbauer 2004)). Der hier vorgestellte Ansatz geht von „Ende-Anfangs Beziehungen“ aus und wurde entsprechend neu entwickelt.

¹⁴⁰ Genauer handelt es sich um Arbeitsstunden.

$\vartheta_{n(m-1),nm}$	Zeitlicher Überschneidungsfaktor von nm und $n(m-1)$, m ist der Subprozess von n [-]
	$\vartheta_{n0,n1} = 1$
T_{nm}	Benötigte Dauer für Bauproduktionsprozesses nm in Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit [h]
$t_{w_{n(m-1),nm}}$	Wartezeit zwischen $n(m-1)$ und nm [h]
	Hierbei gilt:
	$t_{w_{n(m-1),nm}} = 0$, wenn $\vartheta_{n(m-1),nm} < 1$
	$t_{w_{n(m-1),nm}} \in \mathbb{R}^+$, wenn $\vartheta_{n(m-1),nm} = 1$

Der Index n steht für alle Hauptprozesse, die zur Erstellung des Bauobjekts erforderlich sind, $n = 1, \dots, \bar{n}$. Der Index m steht für alle Subprozesse, die im Hauptprozess n erforderlich sind, $m = 1, \dots, \bar{m}$.¹⁴¹

Der zeitliche Überschneidungsfaktor $\vartheta_{n(m-1),nm}$ repräsentiert den Anteil der Produktionsprozessdauer nm der nicht parallel mit Prozess $n(m-1)$ stattfindet. Voraussetzung für die Anwendung der Formel ist, dass die Bauproduktionsprozesse zuvor so gegliedert werden, dass sie „topologisch sortiert“¹⁴² sind¹⁴³. Insofern parallele Bauproduktionsprozesse vorkommen, ist dies bei der Berechnung des Überschneidungsfaktors zu berücksichtigen.

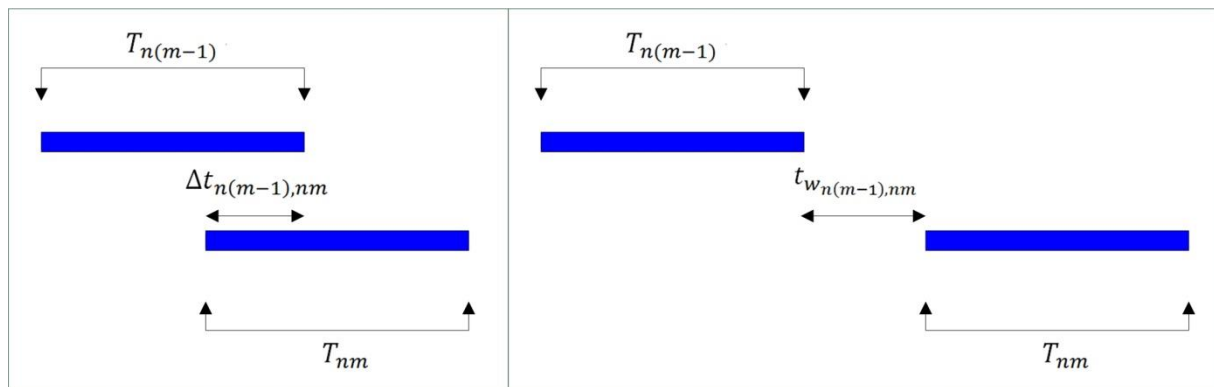


Abbildung 3-10: Produktionsprozessabhängigkeiten

$$\vartheta_{n(m-1),nm} = \frac{T_{nm} - \Delta t_{n(m-1),nm}}{T_{nm}} \quad (3.17)$$

$$\vartheta_{n(m-1),nm_{max}} = \frac{T_{nm} - \Delta t_{n(m-1),nm_{max}}}{T_{nm}} \quad (3.18)$$

$\Delta t_{n(m-1),nm}$ zeitliche Überschneidung von $n(m-1)$ und nm [-]

¹⁴¹ Falls vertragliche Termine auch auf Subprozessebene vorliegen, ist dies zu berücksichtigen, d.h. $T_{max,n}$ muss durch $T_{max,m}$ ersetzt werden. Eine entsprechende Anpassung des Überschneidungsfaktors ist erforderlich.

¹⁴² Dies bedeutet, dass in einer Abhängigkeitsmatrix AB_{kl} (k und $l \in m$), die die Abhängigkeiten des Prozesses k von l darstellt, die Matrix nur unterhalb der Diagonalen mit Werten ausgefüllt ist. Auf der Diagonalen steht immer der Wert eins und oberhalb der Diagonalen sind alle Abhängigkeitskoeffizienten gleich null (vgl. (Girmscheid 2006)).

¹⁴³ Zur topologischen Sortierung eignet sich die Design Structure Matrix (DSM) (vgl. (Koskela 2000)).

¹⁴⁴ Diese Unterscheidung zwischen $\vartheta_{n(m-1),nm}$ und $\vartheta_{n(m-1),nm_{max}}$ ist erforderlich, da im Baubetrieb häufig unterschiedliche Größen für „Überschneidungen“ gewählt werden können (d.h. es existiert ein gewisser Spielraum).

$\Delta t_{n(m-1),nm_{max}}$ *maximal mögliche Überschneidung von $n(m-1)$ und nm [-]*¹⁴⁵

Unter den Annahmen, dass die Losgrößen im Verhältnis zum zu erstellenden Produkt sehr klein¹⁴⁶, die Anzahl der Arbeitsstationen o innerhalb von m gering¹⁴⁷ und die zwischen den Arbeitsstationen vorherrschenden zeitlichen Puffer sehr gering sind, gilt:

$$T_{nm} = \frac{LM_{nm}}{LF_{nm}} \quad (3.19)$$

LM_{nm} *Geforderte Leistungsmenge innerhalb von nm [Einheit¹⁴⁸/h]*

LF_{nm} *Erreichte Leistungsfähigkeit im Produktionsprozess nm [Einheit/h]¹⁴⁹*

Damit die gesetzten Termine eingehalten werden können, muss des Weiteren gelten:

$$LF_{nm} \geq \frac{LM_{nm}}{T_{nm_max}} \quad (3.20)$$

T_{nm_max} *Maximal erlaubte aus T_{max_n} und $\vartheta_{n(m-1),nm}$ resultierende Dauer von nm [h]*

Neben der reinen Produktionsprozessdauer ist ein Abgleich der erforderlichen Kapazitäten der einzelnen Produktionsprozesse notwendig, dies wird im Folgenden dargestellt.

$i \in GPV_{\xi_{nmo}}$, wenn gilt:

$$FKAP_{nmo,i}(t) \geq GFKAP_{nmo,i}(t), \text{ für alle } t \in (T_{nm_A}, \dots, T_{nm_E}) \quad (3.21)$$

$FKAP_{nmo,i}(t)$ *Freie Kapazitäten des Produktionsfaktors i für den Produktionsprozess nm an Arbeitsstation o [Einheit/h]*

$GFKAP_{nmo,i}(t)$ *Geforderte freie Kapazität von i für den Produktionsprozess nm an Arbeitsstation o [Einheit/h]*

T_{nm_A} *Geplanter Startzeitpunkt des Produktionsprozesses nm [h]*

T_{nm_E} *Geplanter Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsprozesses nm [h]*

¹⁴⁵ Diese ist hängt von den notwendigen Anforderungen von Produktionsprozess nm gegenüber $n(m-1)$ ab (vgl. (Girmscheid 2006)).

¹⁴⁶ Diese Bedingung ist sehr wichtig, da sonst die Bearbeitungszeit der einzelnen Arbeitsstationen berücksichtigt werden muss. Beispielsweise müsste T_{nm} um die Zeit verlängert werden, die dadurch entsteht, dass das Arbeitssystem „gefüllt“ wird. Bei unterschiedlichen Losgrößen auch um hieraus entstehende Wartezeiten der Arbeitsprozesse.

Die Losgrößen haben im Erdbau eine andere Bedeutung als in der stationären Industrie, da die Baumaschinen trotz unterschiedlicher Losgrößen ohne Wartezeiten (eingeschränkt) arbeiten können. Dies soll ein Beispiel verdeutlichen:

Beispielsweise schwankt die „Losgröße“ eines Muldenkippers zwischen 10-13 lm^3 und der nachfolgende Produktionsprozess „Einbauen“ erfolgt durch einen Dozer. Der Dozer kann sowohl 10 als auch 13 lm^3 Erdhaufen verteilen (allerdings nimmt seine Leistungsfähigkeit ab einer gewissen Größe - die insbesondere von seinem Schildvolumen abhängt - deutlich ab).

¹⁴⁷ Diese Annahme ist bei detaillierter Planung auf Subprozessebene realistisch, da ein Subprozess aus wenigen Arbeitsstationen besteht. Je weniger Arbeitsstationen umso geringer sind die Einflüsse von Zeitverzögerungen aus Wartezeiten bzw. Prozesszeitenschwankungen (vgl. Bullwhip-Effekt (Forrester 1961)) und „Systemfüllung und -leerung“.

¹⁴⁸ z.B. m, m^2 , m^3 , fm^3 usw.

¹⁴⁹ Zur genaueren Bestimmung von LF_{nm} siehe Kapitel 3.3.1.

Zur Vereinfachung kann das diskretisierte Modell der Auslastung der Bauproduktionsfaktoren betrachtet werden (vgl. Abbildung 3-11).

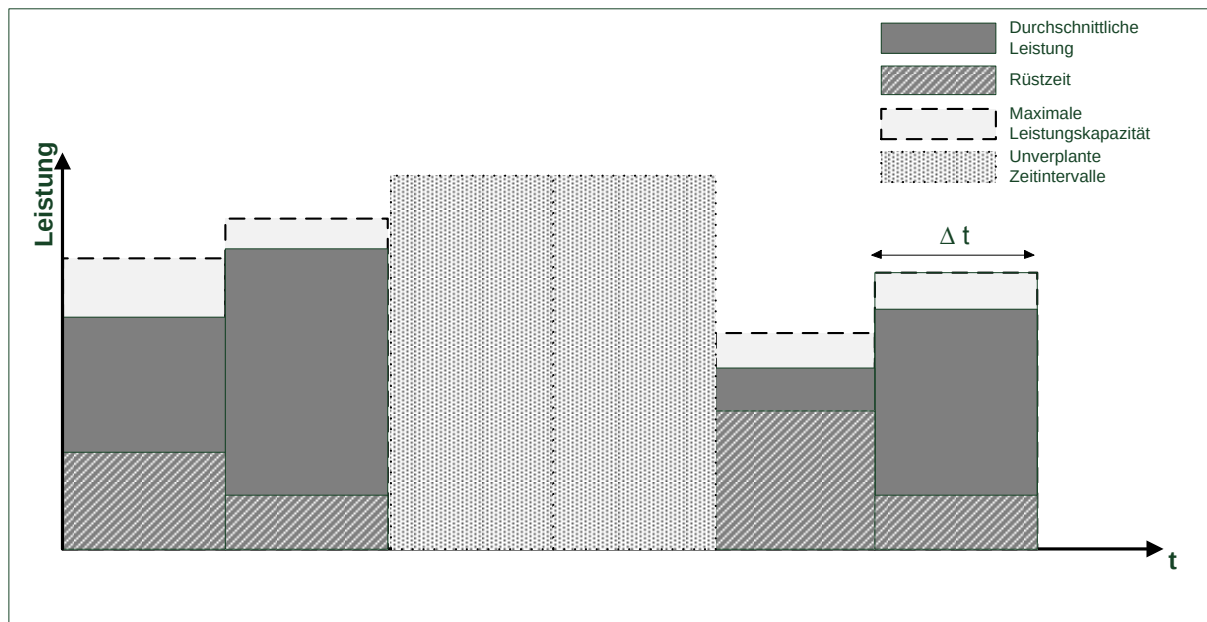


Abbildung 3-11: Exemplarisches diskretisiertes Modell der Auslastung eines Bauproduktionsfaktors

Für eine kleine diskrete Zeitdauer Δt ist davon auszugehen, dass ein Bauproduktionsfaktor nur für eine Aufgabe zur Verfügung steht. Selbst die Infrastruktur und die Arbeitsobjekte können bei räumlicher Eingrenzung für kleine Δt nur einer Aufgabe dienen¹⁵⁰.

Da wie bereits in Abbildung 3-6 dargestellt, die Leistungsfähigkeit einer Kette oder eines Netzwerks von Bauproduktionsfaktoren durch die Leistungsfähigkeit derjenigen Bauproduktionsfaktoren eingeschränkt ist, die die geringste Leistungsfähigkeit haben, muss für alle Bauproduktionsfaktoren die obigen Gleichungen erfüllt sein. Ist dies nicht der Fall, ist eine teilweise Neuplanung erforderlich.

Bisher wurden implizit insbesondere materielle Bauproduktionsfaktoren betrachtet, wird die Sichtweise um immaterielle Bauproduktionsfaktoren erweitert, so kann festgestellt werden, dass immaterielle Bauproduktionsfaktoren stets von materiellen Bauproduktionsfaktoren als Grundlage für eine Tätigkeit benötigt werden. D.h. immaterielle Bauproduktionsfaktoren existieren, um die materiellen Bauproduktionsfaktoren gezielt einzusetzen. Beispielsweise werden bestimmte Informationen benötigt, um eine Tätigkeit durch einen materiellen Bauproduktionsfaktor durchführen zu können. Dies hat unweigerlich zur Folge, dass auch Informationen zum limitierenden Faktor werden können. Die obigen Ausführungen gelten somit ebenfalls für immaterielle Bauproduktionsfaktoren.

Die Notation Eignung bedeutet, dass die Bauproduktionsfaktoren bisher nur die qualitativen Kriterien und die zeitliche Verfügbarkeit erfüllen. Bisher wurden keine Aussagen bezüglich der Kosten getätigt.

¹⁵⁰ Dies bedeutet, dass z.B. das ein Arbeitsobjekt in kleine „Unterteile“ zerlegt wird (im Erdbau können diese als Volumen-Voxel bezeichnet werden (vgl. (A. Ji et al. 2009) und (Rausch et al. 2008))).

3.2.5 Bewertung der einzelnen Kombinationen

Die Kosten für einen Prozess setzen sich im Wesentlichen zusammen aus¹⁵¹:

$$K_n = K_{\text{Beschaffung}} + K_{\text{Vorhaltung}} + K_{\text{Verbrauch}} + K_{\text{Betrieb}} + K_{\text{Rückführung}} + K_{\text{Organisation}} \quad (3.22)$$

K_n Kosten des Hauptprozesses n , $n = 1, \dots, \bar{n}$, wobei $\bar{n}$ gleich der Anzahl der Prozesse ist [€]

$K_{\text{Beschaffung}}$: Beschaffungskosten, die von Bedarfserkennung bis einschließlich Anlieferung entstehen. Im Wesentlichen sind dies Kosten für den Antransport und Kosten, die während der zugehörigen Organisation entstehen, z.B. Zeitaufwand der Mitarbeiter, bis eine Baumaschine bestellt ist.

$K_{\text{Vorhaltung}}$: Kosten, die durch das reine Vorhalten der Bauproduktionsfaktoren entstehen¹⁵², diese sind z.B.:

- Bei Baumaschinen und Baustelleinrichtungsgegenständen kalkulatorische Abschreibung (A), kalkulatorische Verzinsung (V) und Reparaturkosten (R).
- Bei Arbeitskräften der Lohn oder das Gehalt inklusive der Sozial- (Lohnzusatzkosten) und Lohnnebenkosten.
- Bei Material die Kosten, die durch Kapitalbindung entstehen (kalkulatorische Verzinsung V), Kosten die durch Lagerung (z.B. Miete von Flächen oder Gebäuden) und den Verlust von Material entstehen (z.B. bei Erreichen des Verfalldatums oder durch Witterungseinfluss).
- Bei Infrastruktur die Kosten, die durch reine Vorhaltung der Infrastruktur (z.B. Baustraßenerstellung), für Genehmigungen (z.B. Straßensperrungen) und für Anschlüsse (z.B. Strom, Telefon, Wasser usw.) entstehen.

$K_{\text{Verbrauch}}$: Kosten, die durch den Verbrauch von Bauproduktionsfaktoren entstehen, z.B. der Verbrauch von Baumaterial.

K_{Betrieb} : Zusätzliche Kosten, die durch den Betrieb der Bauproduktionsfaktoren entstehen:

- Bei Baumaschinen sind dies beispielsweise Treibstoffkosten, Schmierstoffkosten, Bedienungskosten und Kosten durch Abnutzung¹⁵³.

$K_{\text{Rückführung}}$: Sind Kosten die entstehen, sobald die Bauproduktionsfaktoren auf der Baustelle nicht mehr benötigt wird.

- Bei Baumaschinen sind dies z.B. die Kosten für den Abtransport.
- Bei Arbeitskräften z.B. die Kosten für den Abtransport
- Bei Material z.B. Kosten für Entsorgung und Abtransport
- Bei Infrastruktur sind dies beispielsweise die Kosten, die durch den Abbau der Infrastruktur entstehen (z.B. die Kosten für die Beseitigung der Baustraßen).

¹⁵¹ Es handelt sich hierbei um ein vom Autor erstelltes theoretisches Kostenmodell, welches nicht mit den gängigen Methoden der baubetrieblichen Kalkulation zu verwechseln ist.

¹⁵² Reines Vorhalten bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Baumaschine auf der Baustelle ist und sich nicht im Einsatz befindet.

¹⁵³ Diese sind traditionell allerdings in den AVR. Der Reparaturaufwand steigt jedoch bei intensiver Belastung der Baumaschine an.

K_{Organisation}: Kosten die durch das Organisieren der Bauproduktionsfaktoren entstehen, z.B. Bauleitung, Geschäftsführung und Verwaltung.

Allgemein unterscheidet man bei Kosten zwischen fixen und variablen Kosten. Fixe Kosten¹⁵⁴ sind in dem hier vorgestellten Zusammenhang nicht vom Beschäftigungsgrad, der erstellten Leistungsmenge¹⁵⁵ oder der Bauzeit abhängig, so sind z.B. die Kosten für den Antransport eines Baggers sowohl unabhängig von der Vorhalte- oder Einsatzzeit, als auch von der produzierten Menge. Variable Kosten sind in dem hier verwendeten Zusammenhang zeitabhängig, z.B. je länger die Vorhaltezeit, desto höher die Kosten für AVR.

Die variablen Kosten müssen durch Multiplikation der Kostensätze mit den zugehörigen Zeiten errechnet werden.

$$K_n = \sum_{i=1}^{n_i} K_{ni_{FIX}} + K_{ni_{VAR}} \times T_{ni} \quad [€] \quad (3.23)$$

K_{ni_{FIX}} *Fixe Kosten des Bauproduktionsfaktors i in Bauproduktionsprozess n, i= 1,..., n_i[€]*

K_{ni_{VAR}} *Variable Kosten des Bauproduktionsfaktors i¹⁵⁶[€/h]*

T_{ni} *Dauer der Entstehung der variablen Kosten des Bauproduktionsfaktors i [h]*

Bei der Bauproduktionsplanung werden unterschiedliche Varianten der Ausführung¹⁵⁷ miteinander verglichen und es wird die ökonomischste Variante unter den gegebenen Randbedingungen ausgewählt. Da bereits erwähnt wurde, dass der Erdbau vielen Einflüssen ausgesetzt ist, muss zusätzlich die Robustheit bzw. Flexibilität der ausgewählten Variante ξ berücksichtigt werden. Hierzu muss beurteilt werden, wie die jeweilige Variante auf existierende Einflüsse reagiert.

$$K_{\xi n} = \sum_{i=1}^{n_i} K_{\xi ni_{FIX}} + K_{\xi ni_{VAR}} \times T_{\xi ni} + K_{\xi n_{Sicherheit}} \quad [€] \quad (3.24)$$

K_{ξn_{Sicherheit}} *Sicherheitsrücklage, um die Wahrscheinlichkeit der Kostenüberschreitung der Variante ξ abzusichern, ξ = 1, ..., $\bar{\xi}$ wobei $\bar{\xi}$ gleich der Anzahl aller möglichen Varianten ist [€]*

Für die Baumaschinen des schweren Erdbaus gilt z.B.:

¹⁵⁴ Eine allgemeinere Definition ist z.B. in (Drees 2011) zu finden.

¹⁵⁵ Dies gilt nur unter der Annahme, dass die Anzahl der Produktionsfaktoren konstant bleibt. Ab einer gewissen Menge müssen zusätzliche Produktionsfaktoren eingesetzt werden und die Fixkosten steigen ggf. dementsprechend.

¹⁵⁶ Die variablen Kosten sind in der Realität nicht konstant, sondern z.B. von der Abnutzung des Bauproduktionsfaktors abhängig. Zur Vereinfachung werden hier Mittelwerte verwendet.

¹⁵⁷ Eine Variante der Ausführung kann durch unterschiedlichen Bauproduktionsfaktorkonstellationen und/oder der Wahl unterschiedlicher Bauverfahren entstehen.

Die grundsätzlich zur Verfügung stehenden Methoden zur Bildung alternativer Bauabläufe sind in (Börkircher 2011) dargestellt, ergänzend hierzu sind die Maßnahmen der Ressourcenallokation (z.B. Leistungssteigerung eines Prozesses durch eine größere Baumaschine) und die Bildung von identischen parallelen Arbeitsstationen zu erwähnen.

$$K_{\xi ni_{FIX}} = f(\text{Kosten für Antransport, Aufbau der Baumaschine, Abtransport ...}) \quad (3.25)$$

$$K_{\xi ni_{VAR}} = f(\text{AVR, Treibstoffverbrauch, Schmierstoffe, Wartung und Pflege, ...})^{158} \quad (3.26)$$

$$T_{\xi ni} = f(\text{Leistungsmenge, Witterung, Bodenart, Qualifikation des Fahrers ...}) \quad (3.27)$$

Die Kosten $K_{\xi nm}$ für die Produktionsprozesse nm spannen somit einen Vektor auf, dem unterschiedliche Varianten ξ der Ausführung zu Grunde liegen. Innerhalb einer Variante der Ausführung sind die Kosten für die einzelnen Produktionsprozesse nm sowohl abhängig von den eingeplanten Bauproduktionsfaktoren des jeweils betrachteten Bauproduktionsprozesses als auch von den eingeplanten Bauproduktionsfaktoren anderer Bauproduktionsprozesse¹⁵⁹.

Aus dem gebildeten Vektor ist die Variante mit den geringsten Gesamtkosten auszuwählen.

$$\min[K_{\xi}], \text{ für alle existierenden } \xi \rightarrow GV \quad (3.28)$$

GV Gewählte Variante der Ausführung [-]

Aus der gewählten Variante der Ausführung GV folgen die für eine bestimmte Aufgabenstellung ausgewählten Bauproduktionsfaktoren.

$$GV \rightarrow i_{GV_nmo} \quad (3.29)$$

i_{GV_nmo} Ausgewählter Bauproduktionsfaktor für eine bestimmte Aufgabenstellung [-]

Bisher wurde davon ausgegangen, dass stets ein geeigneter Bauproduktionsfaktor gefunden werden kann, der die geforderte Leistungsmenge innerhalb eines Bauproduktionsprozesses nm erbringen kann. Aus baubetrieblicher Sicht ist dieser Fall jedoch nicht immer gegeben, z.B. falls mehrere Bauproduktionsaufträge vorliegen und diese aufgrund der eingeschränkten Leistungsfähigkeit nicht gleichzeitig bearbeitet werden können. In der baubetrieblichen Praxis wird diesem Sachverhalt durch Verschiebung von einzelnen Bauproduktionsaufträgen¹⁶⁰, Mehrarbeit¹⁶¹, Einsatz von nicht optimal für den Bauproduktionsauftrag geeigneten Bauproduktionsfaktoren, Änderung des Bauverfahrens¹⁶² und durch Beauftragung von Subunternehmern begegnet.

Des Weiteren werden in der Praxis nicht alle möglichen Varianten der Ausführung analysiert. Die Analyse beschränkt sich meist auf bereits im Unternehmen etablierte Ausführungsvarianten.

3.3 Bauproduktionssteuerung

Basierend auf Prognosen ermittelt die Bauproduktionsplanung eine geplante Vorgehensweise für einen bestimmten Bauproduktionsauftrag. Während der Ausführung wirken Einflüsse (vgl. Abbildung 3-4) auf den Bauproduktionsprozess, so dass Abweichungen zu den aus der Bauproduktionsplanung

¹⁵⁸ Es wird darauf verzichtet zwischen Vorhaltezeit und Einsatzzeit zu unterscheiden.

¹⁵⁹ Je nach Variante, können Baumaschinen für mehr oder weniger Produktionsprozesse eingesetzt werden, wodurch die Fixkosten (je Arbeitsstation) unterschiedlich hoch ausfallen.

¹⁶⁰ Oder Teile von diesen.

¹⁶¹ z.B. durch Einführung zusätzlicher Schichten.

¹⁶² Dies geschieht jedoch eher selten.

stammenden Sollwerten entstehen können. Sobald diese Abweichungen erkannt werden, tritt ein kybernetischer Regelkreis in Gang (vgl. Abbildung 3-12).

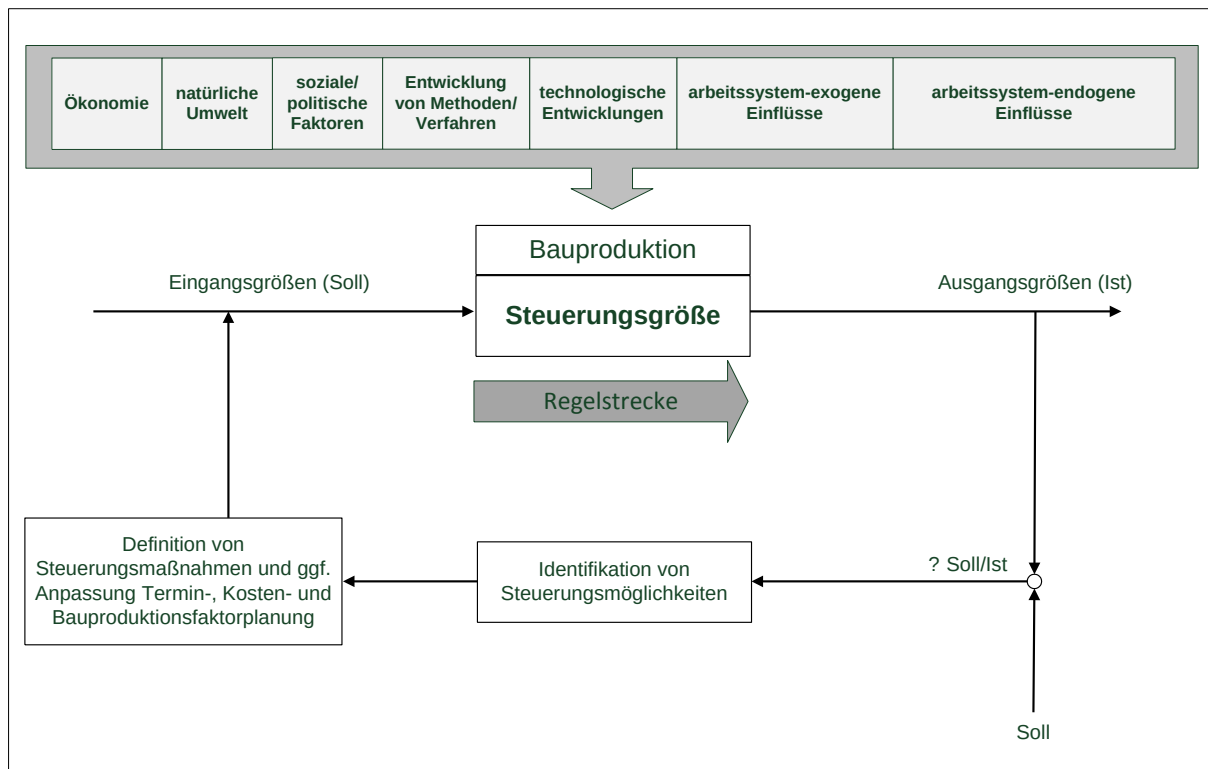


Abbildung 3-12: Kybernetischer Regelkreis im Erdbau (in Anlehnung an (Gehbauer 1974), (Girmscheid 2010a) und (Girmscheid 2010b))

Ausgangslage des kybernetischen Regelkreises bildet die Bauproduktionsplanung, die die Eingangswerte bzw. Sollwerte vorgibt. Die Bauproduktion wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Auf einer Regelstrecke wird versucht, die betrachteten Steuerungsgrößen so zu beeinflussen, dass die vorgegebenen Sollwerte erreicht werden. Meist stimmen die sich ergebenden Ausgangsgrößen nicht exakt mit den vorgegebenen Sollwerten überein. Falls sich Abweichungen zwischen Ist- und Sollwerten ergeben, muss ggf. eingegriffen bzw. gesteuert werden. Hierzu werden geeignete Steuerungsmaßnahmen identifiziert und anschließend an eine Bewertung passende Steuerungsmaßnahmen festgelegt. Die Steuerungsmaßnahmen stellen neue Eingangsgrößen dar, die es wiederum zu erreichen gilt. Der kybernetische Regelkreis beginnt erneut. Können die ursprünglich geplanten Sollwerte nicht erreicht werden, müssen neue Sollwerte definiert und/oder die Planung entsprechend angepasst werden.¹⁶³

Bei Identifizierung von zusätzlichen Chancen ist die Planung evtl. entsprechend anzupassen (z.B. wenn festgestellt wird, dass Baumaschinen unter den realen Bedingungen eine höhere Leistung als in der Prognose angenommen erbringen können).

Veränderungen bezüglich der Sollvorgaben (unter Annahme einer vorgegebenen Qualität) lassen sich insbesondere wie folgt eingliedern:

1. Veränderungen der maximal verfügbaren Kapazität
2. Veränderung der geforderten Kapazität

¹⁶³ vgl. (Kühn 1984) und (Gehbauer 1974).

3. Veränderung der Kosten

Die Fälle 1. und 2. betreffen die Leistungsfähigkeit, Fall 3. die Kosten. Nicht erreichte Qualitätsanforderungen führen direkt zu zusätzlichem Aufwand in Form eines Verbrauchs von Kapazität und Kosten.

3.3.1 Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Bauproduktionsprozessen

Die Funktion der Leistungsfähigkeit LF_{nmo} einer Arbeitsstation o kann generell wie folgt dargestellt werden:

$$LF_{nmo} = f(I_{Am}(t), I_{Ao}(t), I_{IA}(t), I_M(t), I_O(t), I_I(t), I_{MV}(t), E_{\ddot{O}ko}(t), E_{A_{ex}}(t), E_{A_{en}}(t)) \quad (3.30)$$

$I_{Am}(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Arbeitsmittel
$I_{Ao}(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Arbeitsobjekte
$I_{IA}(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Infrastruktur und Arbeitsraum
$I_M(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Mensch
$I_O(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Organisation
$I_I(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Informationen
$I_{MV}(t)$	Menge der Bauproduktionsfaktoren der Gattung Methoden und Verfahren
$E_{\ddot{O}ko}(t)$	Einflussfaktor Ökologie
$E_{A_{ex}}(t)$	Arbeitssystem - exogene Einflussfaktoren
$E_{A_{en}}(t)$	Arbeitssystem - endogene Einflussfaktoren

Alle Parameter sind zeitabhängig.

Die Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 3-4), die aus der Entwicklung von Methoden, Verfahren und Technologien resultieren, wurden in der aufgestellten Gleichung nicht berücksichtigt, da sie bereits durch die eingesetzten Bauproduktionsfaktoren in der Gleichung berücksichtigt sind, z.B. werden durch Technologieentwicklungen neue Baumaschinen verfügbar die leistungsfähiger sind, dann kann dies (insofern beschlossen wurde diese Baumaschinen als Arbeitsmittel für den betrachteten Bauproduktionsprozess einzusetzen) in LF_{nmo} durch ein neues I_{Am} berücksichtigt werden.

Obwohl die Ökonomie ein bedeutender exogener Einflussfaktor ist, spielt sie bei der Betrachtung eines Bauproduktionsprozesses zunächst keine Rolle. Dieser Einflussfaktor wäre z.B. bei anstehenden Investitionsvorhaben zu berücksichtigen. Gleiches gilt für den Einfluss von sozialen oder politischen Faktoren. Diese Faktoren sind bei längerfristigen Entscheidungen zu berücksichtigen.

Die Veränderung der Leistungsfähigkeit eines Produktionsfaktors kann nun wie folgt beschrieben werden:

$$dLF_{nmo,ix} = \frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{\ddot{O}ko}} \times \frac{dE_{\ddot{O}ko}}{dt} + \frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{A_{ex}}} \times \frac{dE_{A_{ex}}}{dt} + \frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{A_{en}}} \times \frac{dE_{A_{en}}}{dt} \quad (3.31)$$

$dLF_{nmo,ix}$ gibt die Summe der Leistungsänderung des Bauproduktionsfaktors i_x , $x \in \{Am, Ao, IA, M, O, I, MV\}$ an, die sich durch Änderungen der Einflussgrößen ergibt. Die Änderung der Einflussgrößen $E_{\ddot{O}ko}, E_{A_{ex}}, E_{A_{en}}$ werden mit $\frac{dE_{\ddot{O}ko}}{dt}, \frac{dE_{A_{ex}}}{dt}, \frac{dE_{A_{en}}}{dt}$ bezeichnet. Die partiellen Differentialquotienten $\frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{\ddot{O}ko}}, \frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{A_{ex}}}, \frac{\partial LF_{nmo,ix}}{\partial E_{A_{en}}}$ erfassen das Verhältnis zwischen einer infinitesimalen Leistungsänderung $\partial LF_{nmo,ix}$ und der diese Leistungsänderung verursachenden infinitesimalen Einflussgrößenänderung $\partial E_{\ddot{O}ko}, \partial E_{A_{ex}}, \partial E_{A_{en}}$.

Hieraus folgt für die Leistungsfähigkeit von „identischen“¹⁶⁴ Bauproduktionsfaktoren einer Gattung, des Bauproduktionsprozess nm , die gemeinsam an einer Arbeitsstation o arbeiten:

$$LF_{nmo,I_x}(t_y) = \sum_{i_x=1}^{\overline{l_{nmo_x}}} (LF_{nmo,i_x}(t_{y-1}) + dLF_{nmo,i_x}(t_y)) \quad (3.32)$$

$LF_{nmo,I_x}(t_y)$ Real erreichbare Leistungsfähigkeit¹⁶⁵ der Bauproduktionsfaktoren I_x an nmo zum Zeitpunkt t_y , der Index y steht hierbei für die Nummerierung der Zeitpunkte¹⁶⁶ [Einheit/h]
 $LF_{nmo,I_x}(t_0)$ In der Planung prognostizierter Referenzwert der Leistungsfähigkeit [Einheit/h]
 I_x Menge identischer Bauproduktionsfaktoren i der Gattung x , $x \in \{Am, Ao, IA, M, O, I, MV\}$

$\overline{l_{nmo_x}}$ ist die Anzahl der parallel arbeitenden Bauproduktionsfaktoren eines Typs (z.B. Baumaschine eines bestimmten Typs, Arbeitskräfte, Informationsverarbeitung, usw.) an Arbeitsstation nmo .

Die real erreichbare Leistungsfähigkeit berechnet sich zu:

$$LF_{nmo}(t_y) = \min\{LF_{nmo,I_x}(t_y)\}, \text{ für alle } I_x \text{ innerhalb von } nmo^{167} \quad (3.33)$$

LF_{nmo} Reale erreichbare Leistungsfähigkeit für alle $x \in \{Am, Ao, IA, M, O, I, MV\}$ und $o = 1, \dots, \bar{o}$. $\bar{o}$ ist die Anzahl der Arbeitsstationen innerhalb von nm [Einheit/h]

Für den Bauproduktionsprozess nm , der von mehreren Bauproduktionsfaktoren und Bauproduktionsfaktortypen bearbeitet wird, sowie unterschiedliche Arbeitsstationen o besitzt (und diese in Linie angeordnet sind)¹⁶⁸, folgt:

$$LF_{nm}(t_y) \cong \min\{LF_{nm1}(t_y), \dots, LF_{nm\bar{o}}(t_y)\}^{169} \quad (3.34)$$

Falls den einzelnen Leistungen der Arbeitsstationen unterschiedliche Mengeneinheiten zugrundeliegen, ist eine Umrechnung durch den Faktor c_o erforderlich, gleiches gilt ebenfalls für LF_{nmo} .

$$LF_{nm}(t_y) \cong \min\{c_1 \times LF_{nm1}(t_y), \dots, c_{o_{nm}} \times LF_{nm\bar{o}}(t_y)\} \quad (3.35)$$

¹⁶⁴ In diesem Zusammenhang sind Bauproduktionsfaktoren identisch, wenn sie gleiche Tätigkeiten ausführen und somit ihre Leistung addiert werden kann.

¹⁶⁵ D.h. es ist diejenige Leistung, die aufgrund der Summe der realen Einflüsse theoretisch erreichbar ist.

¹⁶⁶ Diese sind für jede Arbeitsstation nmo und jeden Produktionsfaktor i unterschiedlich, so dass eigentlich y durch y_{nmoi} ersetzt wird, zur Komplexitätsreduktion wurde an dieser Stelle davon abgesehen.

Eine andere Möglichkeit der Modellierung wäre die Zeiten zu vereinheitlichen und $LF_{nmo,I_x}(t_0)$ so zu bestimmen, dass t_0 dem Zeitpunkt t_y entspricht, bei dem Arbeitsstation o mit der Produktion beginnt.

¹⁶⁷ In (Hopp & Spearman 2011) ist eine längere Diskussion zu dem Thema Engpass und die Wirkung auf eine Produktionslinie zu finden.

¹⁶⁸ Falls es mehrere parallel arbeitende Arbeitsstationen gleichen Typs innerhalb von nm gibt, so müssen diese zusammengefasst und deren Leistungsfähigkeit addiert werden. Komplizierter wird dies bei sich auftrennenden und evtl. später erneut zusammenfließenden Materialflüssen zwischen Arbeitsstationen.

¹⁶⁹ Unter den Annahmen, dass die Losgrößen im Verhältnis zum zu erstellenden Produkt sehr klein sind und die Anzahl der Arbeitsstationen o innerhalb von nm ebenfalls gering (vgl. Fußnote 146, 147). Des Weiteren kann diese Berechnung im Baubetrieb als üblich angenommen werden (vgl. (Girmscheid 2010c): „Die Leistung einer Produktionskette wird immer vom Leitgerät bestimmt“).

$$LF_{nm}(t_0) \cong \min\{c_1 \times LF_{nm1}(t_0), \dots, c_{o_{nm}} \times LF_{nm\bar{o}}(t_0)\} \quad (3.36)$$

$LF_{nm\bar{o}}(t_0)$ Der in der Planung angenommene Leistungswert [Einheit/h]

Solange der Produktionsprozess noch nicht begonnen wurde und keine Ist-Leistungsdaten gewonnen werden konnten, gilt:

$$LF_{nm}(t_y) = LF_{nm}(t_0) \quad (3.37)$$

$LF_{nm}(t_0)$ wird allerdings angepasst, sobald neue Sachverhalte (Planänderungen oder Änderung der Randbedingungen) eine Anpassung erforderlich machen.

Das Ziel der ersten beiden Fälle ist:

$$\int_{t=t_{0_{nm}}}^{t_{E_{nm}}} LF_{nm}(t_y) dt \geq LM_{nm} \quad (3.38)$$

$t_{0_{nm}}$ Startzeitpunkt von nm [h]

$t_{E_{nm}}$ Fertigstellungszeitpunkt nm [h]

LM_{nm} Geforderte Leistungsmenge innerhalb von nm [Einheiten/($t_{E_{nm}} - t_{0_{nm}}$)]

zu garantieren. Diese Gleichung stellt sicher, dass die gesamte Leistungsmenge innerhalb von $t \in [t_{0_{nm}}, \dots, t_{E_{nm}}]$ erstellt werden kann. Damit die dafür benötigte Zeit nicht den in der Planung festgelegten Wert überschreitet, muss des Weiteren gelten:

$$t_{E_{nm}} - t_{0_{nm}} \leq T_{nm_max} \quad (3.39)$$

T_{nm_max} Maximal zulässige Dauer von nm [h]

Da T_{nm_max} eine Dauer ist und keine Aussage bzgl. des real verlaufenden Zeitstrahls des Projekts ermöglicht, muss außerdem gelten:

$$t_{E_{np}} \leq t_{E_{np_max}}^{170} \quad (3.40)$$

$t_{E_{np_max}}$ Maximal zulässiger Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsprozesses np [h]

$$t_{E_{np_max}} = \sum_{m=1}^p \vartheta_{n(m-1),nm} \times T_{nm_max} + t_{w_{n(m-1),nm}} \quad (3.41)$$

p ist der Subprozess, für den der Fertigstellungszeitpunkt $t_{E_{nm}}$ jeweils überprüft wird.

Eine weitere Bedingung ist, dass ein Prozess erst beginnen kann, wenn dessen Vorgänger soweit vorangeschritten ist, dass die Startbedingungen für diesen erfüllt sind und, dass der Startzeitpunkt so gewählt wird, dass der Produktionsprozess auch pünktlich beendet werden kann, d.h.:

¹⁷⁰ Vgl. Formel 3.16 und Fußnote 142.

$$t_{0_{n(m-1)}} + T_{n(m-1)} - (1 - \vartheta_{n(m-1),nm_{max}}) \times T_{nm}^{171} + t_{w_{n(m-1),nm}} \leq t_{0_{nm}} \leq t_{E_{nm_{max}}} - T_{nm_{min}} \quad (3.42)$$

$T_{nm_{min}}$ Minimale Dauer von nm [h]
 $t_{E_{nm_{max}}}$ Spätest möglicher Fertigstellungszeitpunkt von nm [h]

Unter der Annahme, dass für einzelne Zeitabschnitte $\sigma_{nm} = 1, \dots, \overline{\sigma_{nm}}$ unterschiedliche Leistungen erreichbar sind, und diese keinen stetigen Verlauf bilden, gilt:

$$\sum_{\sigma_{nm}=1}^{\overline{\sigma_{nm}}} \int_{t=t_{0_{\sigma_{nm}}}}^{t_{E_{\sigma_{nm}}}} L_{F_{nm\sigma}}(t) dt \geq LM_{nm} \quad (3.43)$$

Die Leistung von $L_{F_{nm\sigma}}(t)$ ist analog zu $L_{F_{nm}}(t)$ zu bestimmen. $t_{0_{\sigma_{nm}}} < t_{E_{\sigma_{nm}}}$, $t_{0_{\sigma_{nm}}}$ und $t_{E_{\sigma_{nm}}} \in [t_{0_{nm}}, \dots, t_{E_{nm}}]$. Innerhalb der einzelnen Zeitabschnitte ist $L_{F_{nm}}(t)$ stetig und wird durch $L_{F_{nm\sigma}}(t)$ dargestellt.

3.3.2 Entwicklung der Kosten in der Bauproduktion

Fall 3 bezieht sich wie bereits erwähnt auf die Veränderung der Kosten. Die Kostenfunktion ergibt sich zu:

$$K_{\xi} = \sum_{n=1}^{\bar{n}} \sum_{m=1}^{\bar{m}} \sum_{i=1}^{i_{nm}} K_{\xi_{nmi_{FIX}}} + K_{\xi_{nm_{Sicherheit}}} + \int_{t_{0_{nmi}}}^{t_{E_{nmi}}} K_{\xi_{nmi_{VAR}}}(t) dt \quad (3.44)$$

$t_{0_{nmi}}$ Beginn der variablen Kostenentstehung [h]
 $t_{E_{nmi}}$ Ende der variablen Kostenentstehung [h]

$m \rightarrow i_{nm}$ jedem Subprozess m ist genau eine bestimmte Anzahl an Bauproduktionsfaktoren $i = 1, \dots, i_{nm}$ zugeordnet.

$K_{\xi_{nmi_{VAR}}}(t)$ ist die Funktion des Verlaufs der variablen Kosten. $K_{\xi_{nmi_{FIX}}}$ sind die mit dem Bauproduktionsfaktor i verbundenen fixen Kosten.

Das generelle Ziel kann als:

$$Ziel = \min[K_{\xi}] \quad (3.45)$$

definiert werden.

Zwischen den drei Kostenanteilen (fixe Kosten, Sicherheitskosten und variable Kosten) existieren Abhängigkeiten. Es kann im Allgemeinen nicht davon ausgegangen werden, dass die Summe der Kostenanteile minimal wird, wenn jeder Kostenanteil sein lokales Minimum erreicht.

Unter den Annahmen, dass:

¹⁷¹ An dieser Stelle ist nicht entscheidend, ob es sich um $T_{nm_{min}}$ oder $T_{nm_{max}}$ handelt, da die maximal zulässige Überschneidung zwischen $n(m-1)$ und nm entscheidend ist.

- In der Planung eine Ausführungsvariante festgelegt wurde,
- Bauproduktionsfaktoren nicht beliebig hinzugezogen und abgezogen werden können¹⁷²,
- $K_{\xi nm \text{Sicherheit}}$ eine in der Planung festgelegte Größe ist, die auf Erfahrungswerten beruht und somit nicht wesentlich verändert wird,

kann für einen kurzfristigen Zeithorizont¹⁷³ Δt (unter Berücksichtigung der langfristigen Ziele, insbesondere Minimierung der Gesamtkosten) die vorübergehende Funktion:

$$\begin{aligned}
 K(t_y) = & K(t_{y-1}) + \sum_{j=1}^{\bar{j}} \left(K_{j_{FIX}} + \int_{t_{y-1}}^{t_{y-1}+\Delta t} K_{j_{VAR}}(t) dt \right) \\
 & + \sum_{k=1}^{\bar{k}} \left(K_{k_{FIX}} - \int_{t_{y-1}}^{t_{y-1}+\Delta t} K_{k_{VAR}}(t) dt \right) \\
 & + \sum_{n=1}^{\bar{n}} \sum_{m=1}^{\bar{m}} \sum_{i=1}^{i_{nm}} \int_{t_{y-1}}^{t_{y-1}+\Delta t} K_{nmi_{VAR}}(t) dt
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

aufgestellt werden. $j = 1, \dots, \bar{j}$ entspricht den Bauproduktionsfaktoren, die innerhalb des Zeithorizonts Δt der Baustelle zusätzlich hinzugefügt werden. Durch das Hinzufügen der Bauproduktionsfaktoren entstehen die fixen Kosten $K_{j_{FIX}}$. $k = 1, \dots, \bar{k}$ entspricht den Bauproduktionsfaktoren, die innerhalb des Zeithorizonts Δt von der Baustelle abgezogen werden. Durch das Abziehen von Bauproduktionsfaktoren entstehen die fixen Kosten $K_{k_{FIX}}$. In einem nächsten Iterationsschritt ist darauf zu achten die Variablen j, k, i, n und m anzupassen, d.h. die Menge der noch laufenden Bauproduktionsprozesse und vorhandenen Bauproduktionsfaktoren wird für den neu zu betrachtenden Zeitraum $t_y + \Delta t$ aktualisiert.

Hieraus folgt das kurzfristige Ziel:

$$Ziel = \min[K(t_y)] \tag{3.47}$$

¹⁷² Dies ist das Ergebnis mehrerer teilstrukturierter Interviews mit Bauleitern, die im Erdbau tätig sind. Für den Erdbau bedeutet dies, dass z.B. Baumaschinen und Arbeitskräfte für eine gewisse Mindestdauer vorgehalten werden müssen.

Z.B. kann unter der Annahme, dass in einem Bagger-LKW Betrieb zu viele LKW vorhanden sind, nicht direkt eine gewisse Anzahl an LKW freigestellt werden. Dies kann erst nach einer gewissen Zeit erfolgen (den Interviews zufolge zwischen einer und zwei Wochen - bei größeren Baustellen).

Dieser Sachverhalt lässt sich darauf zurückführen, dass Infrastrukturmaßnahmen häufig durch einen Generalunternehmer (GU) bearbeitet werden und dieser für die Erdarbeiten spezialisierte Subunternehmer beauftragt.

Unter der Annahme, dass die Erdbauarbeiten ebenfalls durch den GU erfolgen, können nur die Kosten, die durch den Betrieb der Baumaschine entstehen, kurzfristig eingespart werden (und diese nur anteilig, da die Baumaschinen andernfalls nicht ständig unter Last fahren). Die Lohnkosten könnten häufig nicht kurzfristig eingespart werden, da die Arbeitskräfte weiterhin ihren Lohn beziehen. Im Einzelfall entscheiden jedoch die vertraglichen Rahmenbedingungen über den Grad der Flexibilität.

¹⁷³ Dieser ist abhängig von der möglichen Flexibilität (vgl. die Fußnote 172).

Erneut sei darauf hingewiesen, dass eine kurzfristige Kosteneinsparung zu Lasten der Gesamtkostenentwicklung gehen kann. Aus diesem Grund ist das Ziel der Gesamtkostenminimierung stets zu berücksichtigen. Gleichzeitig ist es erforderlich, die Kundenanforderungen zu berücksichtigen.

Aus den Fällen 1. und 2. folgen Veränderungen in der Kostenfunktion, z.B. durch Anpassung des Ressourceneinsatzes, um eine Leistungsvorgabe zu erreichen. Als Entscheidungsgrundlage dienen Prognoseverfahren, die entweder die Leistungsentwicklungen der Projektvergangenheit extrapolieren oder auf einfachen Schätzverfahren beruhen.

Es wird untersucht, ob für einen bestimmten Zeithorizont:

$$\sum_{\sigma=1}^{\bar{\sigma}} \int_{t=t_{0P\sigma}}^{t_{EP\sigma}} LFP_{nm}(t) dt \geq LMP_{nm} \quad (3.48)$$

LFP_{nm}	Prognostizierte Leistungsfähigkeit für nm ¹⁷⁴ [Einheit/h]
$t_{0P\sigma}$	Beginn des Prognosehorizonts von LFP_{nm} im Abschnitt σ [h]
$t_{EP\sigma}$	Ende des Prognosehorizonts von LFP_{nm} im Abschnitt σ [h]
LMP_{nm}	Erforderliche Leistungsmenge im Prognosehorizont [Einheit]

gilt. Insbesondere bei der Wahl eines großen Prognosehorizonts ist damit zu rechnen, dass Abweichungen entstehen. Dies resultiert daraus, dass Prognosen mit steigendem Prognosehorizont ungenauer werden (vgl. Kapitel 5.1.3).

Im Bauwesen vergehen aufgrund der schlechten Informationslogistik generell (relativ zur stationären Industrie) große Zeitspannen zwischen zwei Steuerungszyklen (vgl. Abbildung 3-12). Dies macht bisher größere Prognosehorizonte erforderlich¹⁷⁵.

Falls Abweichungen zwischen prognostizierter und realer Leistungsfähigkeit entstehen und diese den Endtermin gefährden, werden Steuerungsmaßnahmen eingeleitet. Mögliche Steuerungsmaßnahmen sind insbesondere:

- Reallokation von Bauproduktionsfaktoren
- Optimierung der Arbeitswerkzeuge
- Beschaffung von zusätzlichen Bauproduktionsfaktoren
- Verlängerung der Arbeitszeiten
- Änderung der Terminpläne
- Anpassung der Organisation
- Anpassung der Methoden und Verfahren

Im Folgenden wird exemplarisch der Fall der Reallokation von Bauproduktionsfaktoren erläutert.

3.3.3 Ressourcen Allokation in der Bauproduktionssteuerung

Aufbauend auf den in der Planung prognostizierten Leistungsfähigkeiten wird eine „Startkonstellation“ der Bauproduktionsfaktoren bestimmt. Während der Bauproduktion, treten häufig, wie bereits erwähnt,

¹⁷⁴ Diese setzt sich, insofern der Produktionsprozess bereits begonnen hat, aus dem bisherigen Leistungsverlauf und dem in die Zukunft prognostizierten Leistungsverlauf zusammen (z.B. Verfahren des gleitenden Mittelwerts oder der exponentiellen Glättung (vgl. (Tempelmeier 2008))).

¹⁷⁵ Eine Möglichkeit die Länge der Prognosehorizonte zu verringern, ist die Etablierung eines effektiveren und effizienteren Informationsflusses (vgl. Kapitel 2.4.1).

Abweichungen zur Planung auf. Diese Abweichungen entstehen durch Änderung der Leistungsfähigkeit aufgrund von Einflüssen aber auch durch die Bauproduktionssteuerung selbst, z.B. wenn Bauproduktionsfaktoren neu allokiert werden.

Leistungsschwankungen haben zur Folge, dass - insofern stets ein reibungsloser Produktionsablauf gewährleistet sein soll - die Auslastung sinkt und somit unnötige Kosten entstehen.¹⁷⁶

Für die Auslastung eines Bauproduktionsfaktors im Zeitraum Δt , gilt:

$$\rho_{nmo,i,\Delta t} = \frac{\Delta t_{prod_{nmo,i}} + \Delta t_{erh_{nmo,i}}}{\Delta t} \quad (3.49)$$

$\rho_{nmo,i,\Delta t}$ *Auslastung des Bauproduktionsfaktors i an Arbeitsstation nmo im Zeitraum Δt [-]*
 $\Delta t_{prod_{nmo,i}}$ *Produktivzeit des Bauproduktionsfaktors i an Arbeitsstation nmo im Zeitraum Δt [h]*
 $\Delta t_{erh_{nmo,i}}$ *notwendige Erholungszeit von i innerhalb von nmo [h]*

Wichtig ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass ein Teil der Auslastung $\rho_{nmo,i,\Delta t}$ Erholungszeiten sind. Somit entspricht eine hundert prozentige Auslastung der Auslastung, die sozial verträglich ist. Dies ist ein deutlicher Unterschied zum herkömmlichen Verständnis von Auslastung.

Es gilt des Weiteren:

$$\rho_{nmo,i}(t) \times GLF_{nmo,i}(t) = LF_{nmo,i}(t) \quad (3.50)$$

$GLF_{nmo,i}(t)$ *Theoretisch erreichbare Leistungsfähigkeit des Bauproduktionsfaktors i unter den gegebenen Randbedingungen [Einheit/h]*

Hieraus folgt, dass (unter der Annahme, dass $GLF_{nmo,i_x}(t)$ erreicht werden kann¹⁷⁷) ein Einsparpotential existiert, wenn gilt¹⁷⁸:

$$\sum_{i_x=1}^{\overline{i_{nmo_x}}} (GLF_{nmo,i_x}(t) - LF_{nmo,i_x}(t)) \geq \min \{GLF_{nmo,1}(t), \dots, GLF_{nmo,\overline{i_{nmo_x}}}(t)\} \quad (3.51)$$

Da eine permanente Reallokation der Bauproduktionsfaktoren im Erdbau unrealistisch ist, findet eine Reallokation nur statt, wenn für einen bestimmten Zeithorizont Δt gilt:

¹⁷⁶ d.h. falls in jeder Situation ein reibungsloser Ablauf gewährleistet sein muss, müssen die Leistungsspitzen abgedeckt werden, was dazu führt, dass das Produktionssystem für die meiste Zeit überdimensioniert ist (vgl. Kapitel 5.1.2).

¹⁷⁷ Ist dies nicht der Fall, ist $GLF_{nmo,i_x}(t)$ durch einen anderen realistischen Wert zu ersetzen. Alternativ kann durch Messung der Auslastung $\rho_{nmo,i_x,\Delta t}$ festgestellt werden wie groß $GLF_{nmo,i}(\Delta t)$ ist. $GLF_{nmo,i}(\Delta t)$ repräsentiert den Leistungswert, der von einem Bauproduktionsfaktor unter den vorherrschenden Arbeitsbedingungen erbracht werden kann. Des Weiteren ist $GLF_{nmo,i}(\Delta t)$ so zu wählen, dass eine Überforderung des betrachteten Bauproduktionsfaktors ausgeschlossen ist.

¹⁷⁸ Vereinfachend wird angenommen, dass keine Verluste durch Behinderungen, die aus der Anzahl der Bauproduktionsfaktoren einer Art entstehen, existieren. Über Abminderungsfaktoren könnte man allerdings auch diese berücksichtigen. Der Zusammenhang der Leistungsentwicklung in Abhängigkeit der Anzahl der involvierten Bauproduktionsfaktoren ist in (Gehbauer 1974) exemplarisch für den Bagger-LKW-Betrieb dargestellt.

$$\begin{aligned} & \sum_{i_x=1}^{\overline{l_{nmo_x}}} \int_t^{t+\Delta t} (GLF_{nmo,i_x}(t) - LF_{nmo,i_x}(t)) dt \\ & \geq \min \left\{ \int_t^{t+\Delta t} GLF_{nmo,1}(t) dt, \dots, \int_t^{t+\Delta t} GLF_{nmo,\overline{l_{nmo_x}}}(t) dt \right\} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Um zu verhindern, dass plötzlich auftretende starke Schwankungen ein Einsparpotential vortäuschen ist des Weiteren als Bedingung festzuhalten, dass zwischen t und $t + \Delta t$ eine relativ gleichmäßige Einsparung vorliegt, d.h.:

$$LF_{nmo,i_x}(t) \cong \text{const.} \wedge GLF_{nmo,i_x}(t) \cong \text{const.}, \text{ für alle betrachteten } t \quad (3.53)$$

Die Bauproduktionsfaktoren $i_x \in [1, \dots, \overline{l_{nmo_x}}]$, für die gilt:

$$\int_t^{t+\Delta t} GLF_{nmo,i_x}(t) dt \leq \sum_{i_x=1}^{\overline{l_{nmo_x}}} \int_t^{t+\Delta t} (GLF_{nmo,i_x}(t) - LF_{nmo,i_x}(t)) dt \quad (3.54)$$

stehen grundsätzlich für eine Reallokation zur Verfügung, insofern sich das System weiterhin so verhält wie während Δt . In einem nächsten Schritt sind die Arbeitsstationen zu identifizieren, die zusätzliche Bauproduktionsfaktoren benötigen. Hierzu muss identifiziert werden, welche Arbeitsstationen einen Engpass darstellen. Ein Indiz für einen Engpass ist eine hohe Auslastung oder große Pufferbestände zwischen Engpass und vorgelagertem Produktionsprozess, d.h.:

$$\rho_{nmo,i_{\Delta t}} \geq 1^{179}$$

oder

$$\int_t^{t+\Delta t} LF_{nm(o-1)}(t) - LF_{nmo}(t) dt \geq AB_{max} \quad (3.55)$$

AB_{max} Maximale zugelassene Leistungsdifferenz¹⁸⁰ zweier benachbarter Arbeitsstationen in Δt [Einheit/h]

AB_{max} ist ein Indikator für die Entwicklung von Puffern zwischen zwei Systemen. Wichtig ist, dass sich $LF_{nm(o-1)}$ und LF_{nmo} auf die gleiche Mengeneinheit beziehen.

Damit nicht erst im Nachhinein festgestellt wird, welche Bauproduktionsfaktoren für eine Reallokation geeignet gewesen wären, sind entsprechende Prognosewerte in die Funktionen einzusetzen.

¹⁷⁹ Aufgrund der notwendigen Erholungszeit, die einen fixen Wert darstellt, sind Auslastungen > 1 möglich.

¹⁸⁰ Die Auslegung der maximalen Leistungsmengendifferenz hängt sehr stark von der Anwendung ab.

Der durch eine Reallokation entstandene relative Kostenvorteil innerhalb eines Zeitraums Δt , kann durch die Verringerung der Opportunitätskosten¹⁸¹ für eine bestimmten Bauproduktionsfaktorart x innerhalb einer Arbeitsstation nmo dargestellt werden¹⁸².

$$OK_{nmo, I_x}(\Delta t) = \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} \left(1 - \frac{\int_t^{t+\Delta t} LF_{nmo, i_x}(t) dt}{\int_t^{t+\Delta t} GLF_{nmo, i_x}(t) dt} \right) \times \int_t^{t+\Delta t} K_{nmo, i_x, VAR} dt \quad (3.56)$$

OK_{nmo, I_x} Opportunitätskosten der Arbeitsstation nmo für I_x [€]

In dem hier vorgestellten Zusammenhang sind die Opportunitätskosten so festgelegt worden, dass die „verlorenen“ Erlöse mindestens kostendeckend sind.

Mit dem zuvor beschriebenen Zusammenhängen kann die Funktion der entstehenden Opportunitätskosten vereinfacht werden zu:

$$OK_{nmo, I_x}(\Delta t) = \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} (1 - \rho_{nmo, i_x, \Delta t}) \times \int_t^{t+\Delta t} K_{nmo, i_x, VAR} dt \quad (3.57)$$

Da sich die Opportunitätskosten sowohl für den Bauproduktionsprozess, der Bauproduktionsfaktoren „abgibt“, als auch für denjenigen der Bauproduktionsfaktoren „aufnimmt“, ändern, muss die Summe beider Opportunitätskosten geringer werden als die vorherige Summe der Opportunitätskosten, um einen Kostenvorteil zu erreichen. Unter der Annahme geringer Transaktionskosten¹⁸³, gilt eine Reallokation als vorteilhaft, wenn:

$$\begin{aligned} & \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} (1 - \overline{\rho_{nmo, i_x, \Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nmo, i_x, VAR}} dt \\ & + \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} (1 - \overline{\rho_{nmo, \bar{i}_x, \Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nmo, \bar{i}_x, VAR}} dt \\ & > \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} (1 - \overline{\rho_{nmo, \bar{i}_x, \Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nmo, \bar{i}_x, VAR}} dt \\ & + \sum_{i_x=1}^{\overline{I_{nmo, x}}} (1 - \overline{\rho_{nmo, i_x, \Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nmo, i_x, VAR}} dt \end{aligned} \quad (3.58)$$

¹⁸¹ „Als Opportunitätskosten bezeichnet man den Nutzenentgang (=entgangener Erlös) aus der nicht realisierten Alternativverwendung knapper Güter.“ (Wöhe & Döring 2013)

¹⁸² Es ist deutlich zu erwähnen, dass in der Praxis kein Vergleich der Opportunitätskosten stattfindet. In dem hier vorgestellten Zusammenhang dienen die Opportunitätskosten dazu die Vorteilhaftigkeit von Reallokalationen quantitativ darstellen zu können.

¹⁸³ Transaktionskosten sind diejenigen Kosten, die mit einer Übertragung einhergehen (vgl. (Wöhe & Döring 2013)).

Falls dies nicht der Fall sein sollte, sind die bei einer Transaktion entstehenden Kosten in der Formel zu berücksichtigen. Hassanein und Moselhi schreiben hierzu: „For linear projects, assigning crews to nonadjacent units prolongs the construction schedule and increase total cost...“ (Hassanein & Moselhi 2004). Dies entspricht dem Gedanken von Transaktionskosten, die in Form von „Wechselzeit“ entstehen.

Transaktionskosten können z.B. durch zusätzliche Fixkosten modelliert werden (vgl. hierzu Formel 3.60).

gilt. Wobei die Mengen $\{1, \dots, \overline{l_{nm\bar{o}_x}}\}$ und $\{1, \dots, \overline{l_{nm\bar{o}_x}}\}$ den Systemzustand vor der Reallokation und die Mengen $\{1, \dots, \overline{l_{nm\bar{o}_x}}\}$ und $\{1, \dots, \overline{l_{nm\bar{o}_x}}\}$ den Systemzustand nach der Reallokation darstellen. Entsprechendes gilt für $\overline{\rho_{nm\bar{o}, l_{x\Delta t}}} / \overline{\rho_{nm\bar{o}, l_{x\Delta t}}}$, $\overline{\rho_{nm\bar{o}, l_{x\Delta t}}} / \overline{\rho_{nm\bar{o}, l_{x\Delta t}}}$, $\overline{K_{nm\bar{o}, l_{xVAR}}} / \overline{K_{nm\bar{o}, l_{xVAR}}}$ und $\overline{K_{nm\bar{o}, l_{xVAR}}} / \overline{K_{nm\bar{o}, l_{xVAR}}}$. $\bar{o}$ und $\bar{o}$ sind die Bauproduktionsprozesse, die von der Reallokation direkt betroffen sind (ein Prozess nimmt Bauproduktionsfaktoren auf und einer gibt Bauproduktionsfaktoren ab).

Da auch weitere Arbeitsstationen und Arten von Bauproduktionsfaktoren durch die Reallokation indirekt betroffen werden¹⁸⁴, kann die Gleichung erweitert werden, zu:

$$\sum_{i \in M_i} (1 - \rho_{nmo, i_{\Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} K_{nm, i_{VAR}} dt > \sum_{i \in M_i} (1 - \overline{\rho_{nmo, i_{\Delta t}}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nm, i_{VAR}}} dt \quad (3.59)$$

M_i ist die Menge aller Bauproduktionsfaktoren. $\rho_{nmo, i_{\Delta t}}$ ist die Auslastung des Bauproduktionsfaktors i vor der Reallokation und $\overline{\rho_{nmo, i_{\Delta t}}}$ die Auslastung nach der Reallokation (entsprechendes gilt für $K_{nm, i_{VAR}}$ und $\overline{K_{nm, i_{VAR}}}$).

Ist diese Gleichung erfüllt, ist eine Reallokation aus Sicht der Opportunitätskosten sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass alle terminlichen und qualitativen Anforderungen eingehalten werden.

Ähnlich ist der Sachverhalt, wenn neue Bauproduktionsfaktoren dem System von außen zugeführt werden. Da zusätzliche Fixkosten durch den Antransport etc. entstehen, muss die Funktion um diese Kosten erweitert werden. Außerdem ändert sich die Menge der Bauproduktionsfaktoren nach der Zuführung zu $\overline{M_i}$.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in M_i} (1 - \rho_{nmo, i_{\Delta t}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nm, i_{VAR}}} dt \\ & > \sum_{j=1}^J K_{jFIX} + \sum_{i \in \overline{M_i}} (1 - \overline{\rho_{nmo, i_{\Delta t}}}) \times \int_t^{t+\Delta t} \overline{K_{nm, i_{VAR}}} dt \end{aligned} \quad (3.60)$$

j entspricht den Bauproduktionsfaktoren, die innerhalb von Δt hinzugefügt werden und K_{jFIX} den damit zusammengehörigen Fixkosten.

Entsprechend kann auch die Gleichung für die Rückführung von Bauproduktionsfaktoren aufgestellt werden.

Ist diese Gleichung erfüllt, ist die Zuführung zusätzlicher Bauproduktionsfaktoren/(Rückführung von Bauproduktionsfaktoren) aus Sicht der Opportunitätskosten sinnvoll. Bedingung ist erneut die Einhaltung der terminlichen und qualitativen Anforderungen.

Die Einsparung der Opportunitätskosten ist allerdings nur von Vorteil, wenn eine Beschleunigung bzw. Erhöhung der Leistungsfähigkeit gleichzeitig eine reale Kostenersparnis bedeutet. Dies ist insbesondere der Fall, wenn:

¹⁸⁴ z.B. ist die Auslastung eines Produktionsprozesses auch von der Lieferfähigkeit des Vorgängerprozesses abhängig.

- früher „frei werdende“¹⁸⁵ Bauproduktionsfaktoren anderweitig gewinnbringend eingesetzt werden können oder
- der Kunde bereit ist, für eine frühere Fertigstellung zu bezahlen oder
- die variablen Kosten der früher frei werdenden Bauproduktionsfaktoren eingespart (oder zumindest verringert) werden können.

Gleiches gilt für eine Minderung der Leistungsfähigkeit. Diese ist insbesondere von Vorteil, wenn:

- freigestellte Bauproduktionsfaktoren anderweitig gewinnbringend eingesetzt werden können¹⁸⁶ oder
- variablen Kosten der freigestellten Bauproduktionsfaktoren eingespart (oder zumindest verringert) werden können.

Eine solche Optimierung anhand der Opportunitätskosten - wie hier vorgestellt – ist einer kapazitiven Optimierung gleichzusetzen ist. Im Unterschied zu bisherigen Ansätzen wurde allerdings immer die Entwicklung aus Sicht des Gesamtsystems berücksichtigt. Eine isolierte kapazitive Optimierung von einzelnen Prozessen oder Prozessabschnitten macht nur Sinn, wenn dies aus Sicht des Gesamtprozesses sinnvoll ist.

Abschließend ist zu erwähnen, dass in der baubetrieblichen Praxis für die Produktionsplanung und -steuerung bisher hauptsächlich einfache Heuristiken in Form von „Daumenregeln“ verwendet werden.

¹⁸⁵ Unter „frei werdend“ ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass die Bauproduktionsfaktoren keine weiteren Aufgaben innerhalb der betrachteten Bauaufgabe haben.

¹⁸⁶ Bei eigenen Baumaschinen würde eine Rückführung beispielsweise keinen Vorteil erbringen, wenn sie nach der Rückführung auf eine neue Bauaufgabe „warten“ müssen.

4 Analyse der IST-Situation des Erdbaus

Nachdem in Kapitel 3 eine generische Beschreibung der Bauproduktionsplanung und –steuerung aufgestellt wurde, widmet sich Kapitel 4 der exemplarischen Beschreibung der IST-Situation der Bauproduktionsplanung und –steuerung im Erdbau. Die Beschreibung der IST-Situation der Bauproduktionsplanung und –steuerung erfolgt anhand durchgeführter Literaturanalysen, Baustellenbeobachtungen und Interviews. Kapitel 4.1 bietet einen Überblick zur technischen Entwicklungen im Erdbau. In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse von durchgeführten Baustellenbeobachtungen und Interviews dargestellt. Abschließend wird in Kapitel 4.3 erläutert, welche Kritikpunkte es an der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung gibt. Ziel der in Kapitel 4 durchgeführten Analyse der IST-Situation ist die Identifizierung von Verbesserungspotentialen.

4.1 Technische Entwicklungen im Erdbau

In den letzten vierzig Jahren hat der Erdbau - ähnlich wie die meisten Produktionen - eine deutliche Technisierung erfahren. Die Kombination von mechanischen und informationstechnischen Entwicklungen hat zum einen dazu geführt, dass insbesondere auf Maschinenebene deutliche Leistungssteigerungen möglich wurden. Zum anderen haben diese Entwicklungen dazu geführt, dass das Aufgabenspektrum der Baumaschinen größer geworden ist. Weiterentwicklungen haben hierbei insbesondere in den Bereichen (vgl. (Tatum et al. 2006) und (Sturm & Vos 2008)):

- Vernetzung (insb. Sensorik und die Verwendung der gewonnen Informationen),
- Telematik (insb. GPS und Lasertechnologie),
- Antrieb,
- Motor und
- Arbeitswerkzeuge

stattgefunden. Da jedoch meistens mehrere unterschiedliche Maschinen - sequenziell und parallel - zur Produktion notwendig sind (z.B. Bagger, LKW, Planierdrape und Walze), ist insb. auch eine gute Interaktion zwischen diesen erforderlich. Aus diesem Grund sind die Entwicklungen der letzten Jahre dazu übergegangen, die Ebene der Maschinenteam zu unterstützen (vgl. (Günthner et al. 2006)). Entwicklungen aus diesem Bereich sind insbesondere (vgl. (Mattivi 2008) und (Kirn et al. 2013)):

- Flottenmanagement Systeme¹⁸⁷ und
- 3-D Echtzeitvisualisierungen¹⁸⁸.

Neben Systemen, die die operative Ausführung unterstützen, sind insbesondere Softwareprogramme (weiter)entwickelt worden, die die Planungsphase unterstützen. Hierzu gehören zum einen klassische Planungstools aus dem Projektmanagement. Insbesondere handelt es sich hierbei um Programme aus den Bereichen:

- Terminplanung¹⁸⁹ und
- Kalkulation¹⁹⁰.

Zum anderen sind für den Erdbau spezifischere Programme entstanden, hierzu gehören insbesondere:

¹⁸⁷ z.B. Topcon Tierra oder der Trimble Construction Manager

¹⁸⁸ z.B. Trimble Topcon Sitelink 3D

¹⁸⁹ z.B. MS Project oder Asta Powerproject

¹⁹⁰ z.B. RIB ARRIBA

- Bauwerksplanung unterstützende Programme¹⁹¹ und
- Programme, die die Einsatzplanung der Baumaschinen unterstützen¹⁹².

Aktuelle Entwicklungen gehen dazu über, eine ganzheitliche Produktionsabwicklung zu unterstützen. Damit dies mögl. ist, wird insbesondere die Integration folgender Punkte angestrebt(vgl. (Kirn et al. 2013), (Günthner et al. 2011) und (Viljamaa et al. 2012):

- Lebenszyklusgedanke
- Simulationen
- Entscheidungsunterstützungssysteme
- Planungsdaten
- Integration von Realdaten
- Verwendung offener Systeme

Die Entwicklungen gehen somit - ähnlich wie im Hochbau - in Richtung eines integralen BIM¹⁹³. Derzeit existiert jedoch kein kommerzielles Programm, das alle obigen Punkte abdeckt.

Die Anwendung der neueren obigen Technologien in der baubetrieblichen Praxis wie z.B. von Telematik, Flottenmanagement Systemen und 3D-Echtzeitvisualisierungen kann anhand durchgeführter Interviews und Beobachtungen als niedrig bis sehr niedrig eingestuft werden. Viele Unternehmen schrecken insbesondere die hohen Anschaffungskosten ab.

Alle technologischen Unterstützungen benötigen, damit sie korrekt funktionieren, die Eingabe von notwendigen Inputdaten. Häufig ist es nicht sinnvoll, dass diese Eingabe automatisiert stattfinden, z.B. findet ein Hauptteil der heutigen Produkt- und Produktionsplanung „manuell“ statt. Insofern entstehen Informationsschnittstellen zwischen Technologie und Mensch. Das Management der manuellen Informationsgenerierung und das Management der Schnittstellen zwischen Technologie und Mensch kann als wesentliche Zukunftsaufgabe des Baubetriebes angesehen werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird anhand von durchgeführten Interviews und Beobachtungen beschrieben, was für Optimierungspotentiale im Erdbau vorhanden sind.

4.2 Identifikation von Optimierungspotential im Erdbau anhand von Baustellenbeobachtungen und Interviews

Zur Identifizierung von im Erdbau bestehenden Optimierungspotentialen hat der Autor vier Bauprojekte besichtigt und an drei Bauprojekten Videoauswertungen vorgenommen. Der Fokus der Baustellenbeobachtungen lag hierbei auf dem Shopfloor, d.h. auf der Ausführung der eigentlichen Bautätigkeit. Die durch die Beobachtungen aufgenommenen Daten reichen jedoch nicht aus, um eine akzeptable statistische Signifikanz zu gewährleisten, d.h. ein valider Schluss bzgl. der Grundgesamtheit

¹⁹¹ z.B. STRATIS oder sonstige CAD Programme

¹⁹² Hierunter sind insbesondere Programme zu verstehen, die die Leistungsberechnung und Auswahl der geeigneten Maschinenteams unterstützen. Hierunter fallen z.B. VehSim von Caterpillar, The Fleet Production and Cost Analysis (FPC) von der Channel Systems Group und das Programm TALPAC von Runge Pincock Minarco.

¹⁹³ vgl. Kapitel 2.4.7. Eine Softwarelösung in diesem Bereich ist z.B. RIB iTWO. ¹⁹³ iTWO ist bereits eine Plattform, die die Punkte BIM, Kalkulation und Projektmanagementsoftware vereint.

ist aufgrund der Beobachtungen letztlich nicht möglich. Dennoch geben die Ergebnisse einen guten Eindruck davon, welche Probleme in der Bauproduktion vorherrschen.

Neben den Beobachtungen hat ein Wissensaustausch mit 7 Bauleitern, 5 Baumaschinensensorikherstellern, 2 Bauberatern, 1 Polier, 3 Baumaschinenführern, 2 Projektmanagern und mehreren Wissenschaftlern stattgefunden, um die Ergebnisse der Beobachtungen zu validieren und weitere Punkte aufzunehmen, die aus einer reinen Beobachtung nicht abgeleitet werden konnten. Des Weiteren konnten viele Optimierungspotentiale durch durchgeführte Literaturanalysen validiert werden.

Auf Basis der Baustellenbeobachtungen und des durchgeführten Wissensaustauschs konnten insbesondere folgende Verbesserungspotentiale identifiziert werden:

- **Verbesserung der Koordination**

Insbesondere:

- Klärung von notwendigen Voraussetzungen für die Durchführung der einzelnen Arbeiten
- Klärung von Einschränkungen und Randbedingungen bei der Durchführung von Arbeiten
- Verbesserung der Koordination der einzelnen Arbeiten (d.h., wann , was, von wem, wie und mit welchen Bauproduktionsfaktoren aus welchem Grund bearbeitet wird)

- **Verringerung der Verschwendungsanteile während der Ausführung von Arbeiten**

Insbesondere:

- Minimierung von Transportstrecken
- Optimierung von Bewegungsabläufen der Baumaschinen
- Verbesserung des Flächenmanagements
- Verwendung von für die Ausführung optimalen Baumaschinenkonstellationen

- **Verstetigung der Produktionsprozesse**

Insbesondere:

- Minimierung von Prozessvarianzen (z.B. Zwischenankunftszeiten der Transportfahrzeuge)
- Abstimmung von Vorgänger- und Nachfolgerprozess
- Insofern eine Abstimmung nur bedingt mögl. ist, sind geeignete Maßnahmen zur Minimierung der negativen Konsequenzen zu treffen (z.B. das Bilden von Puffern)

- **Verbesserung der Informationslogistik**

Insbesondere:

- Integration der in der Ausführung tätigen Personen in die Planung
- Einsatz geeigneter Kommunikationsmedien

- **Einführung von geeigneten vertraglichen Rahmenbedingungen**

Insbesondere:

- Steigerung der Anreize zur Kooperation zwischen den Vertragspartner.¹⁹⁴

¹⁹⁴ Die Art und Weise der vertraglichen Gestaltung entscheidet letztlich darüber, wie die einzelnen Vertragspartner sich bei der Projektabwicklung verhalten. Durch eine geschickte vertragliche Gestaltung wird der Anreiz zu kooperativen Verhalten unter den Beteiligten gestärkt. Dies ist insbesondere bei der Beauftragung von mehreren

▪ Sensibilisierung der Baubeteiligten für kontinuierliche Verbesserung

- Bildung eines gezielten Wissensmanagements zum Thema „kontinuierliche Verbesserung“ bzw. Lean Management
- Integration der Beteiligten
- Bildung einer entsprechenden Unternehmenskultur

Das in Kapitel 3 dargestellte Vorgehen der traditionellen Bauproduktionsplanung und -steuerung bietet eine erste Ausgangslage, um Prozessverbesserungen vorzunehmen. Das gesamte in den aufgelisteten Punkten verborgene Verbesserungspotential ist jedoch nur zugänglich, wenn geeignete Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung identifiziert und implementiert werden, die diese Potentiale zugänglich machen und ein Ausschöpfen ermöglichen. Damit diese Methoden wiederum langfristig funktionieren können, ist es des Weiteren erforderlich, eine passende Unternehmenskultur einzuführen (vgl. (Keith 2013)). Diese Unternehmenskultur muss insbesondere durch Punkte wie: Integration, Transparenz, Motivation, hohe Wertschätzung des Individuums, Selbstverantwortung und Gerechtigkeit gekennzeichnet sein. Der letzte Punkt der obigen Aufzählung „Sensibilisierung der Baubeteiligten für kontinuierliche Verbesserung“ ist dabei der entscheidendste Punkt, um Verbesserungspotentiale zu aktivieren.¹⁹⁵ Die Ansätze des LMB (vgl. Kapitel 2) betreffen die integrale Verbesserung der aufgelisteten Sachverhalte und sind somit besonders vielversprechend.

4.3 Kritik an der traditionellen Vorgehensweise in der Bauproduktionsplanung und -steuerung

Der traditionelle Ansatz der Bauproduktionsplanung besteht in der isolierten Lösung einzelner Produktionsprobleme und der schrittweisen iterativen Anpassung der einzelnen Lösungsstrategien (auch bekannt unter dem Namen „Sukzessivplanung“). Hierzu werden die einzelnen Problemstellungen sehr genau analysiert und eine Lösungsmöglichkeit erarbeitet. Problematisch an diesem Ansatz ist insbesondere, dass aufgrund der vorhandenen Komplexität künstlich einzelne in sich geschlossene und „unabhängige“ (Teil-)Systeme gebildet und anschließend erneut verknüpft werden. Somit wird in jedem Iterationsschritt die Emergenz¹⁹⁶ des Gesamtsystems vernachlässigt. Das Ergebnis sind nicht optimale Lösungsstrategien, die im Extremfall das Gesamtergebnis deutlich verschlechtern. Verstärkt wird dies durch die mangelnde Integration der Prozessbeteiligten bei der Planung bzw. isolierte Planung von Einzelnen.

Ein Grundsatz der herkömmlichen Produktionsplanung ist die Zerlegung der einzelnen Aufgabenbereiche und Tätigkeiten nach dem Prinzip der Transformation¹⁹⁷ (vgl. (PMBOK 2008)). Diese Herangehensweise negiert jedoch die weiteren Sichtweisen auf eine Produktion (namentlich das Flussprinzip und den Ansatz der Wertschöpfung¹⁹⁸, vgl. (Koskela & Howell 2002)). Traditionell werden Arbeitspakete gebildet und deren Durchführung von hierfür Verantwortlichen in der Arbeitsvorbereitung geplant. Die Bauproduktionsplanung erfolgt hierbei in den seltensten Fällen von

Subunternehmern wichtig, da diese sonst verstärkt ihre eigenen Prozesse optimieren und nicht immer im Sinne der gesamten Produktion handeln (für weitere Informationen siehe (Heidemann 2010)).

¹⁹⁵ Goldratt schreibt hierzu passend: „It turned out that any improvement, no matter how big, is not sufficient. Only a process of ongoing improvement can sustain a company's excellent performance in the long run. Sounds quite trivial, but its ramifications are far from being trivial.“(Goldratt 1990)

¹⁹⁶ Emergenz bedeutet in diesem Zusammenhang die Bildung von neuen Eigenschaften oder Strukturen eines (Teil-)Systems infolge des Zusammenspiels seiner Elemente.

¹⁹⁷ vgl. Kapitel 2.5.

¹⁹⁸ vgl. Kapitel 2.5.

denjenigen Personen, die später auch an der Ausführung beteiligt sind. Die Planenden in der Arbeitsvorbereitung haben nur eine begrenzte Kenntnis bezüglich der in der Ausführung existierenden Restriktionen, die die Ausführenden während des späteren Bauablaufs einschränken (z.B. existierende Abhängigkeiten von Prozessen). Generell wird in der traditionellen Produktionsplanung zu wenig Aufwand in die Sammlung von notwendigen Informationen investiert (vgl. (Formoso & Isatto 2009)).

Die geglaubte Sicherheit des Transformationsprinzips, durch stringente isolierte Betrachtung von einzelnen Produktionsprozessen und eine entsprechend angepasste Aufbau- und Ablauforganisation die Produktion optimieren zu können, bewahrheitet sich insbesondere bei entstehenden Abweichungen gegenüber den für die Produktionsplanung angenommenen Bedingungen nicht. Gerade im Bauwesen treten häufig Abweichungen gegenüber den in der Planung angenommenen Bedingungen auf (vgl. Kapitel 3.1.2). Von der Planung abweichende einzelne Prozesse führen zu Veränderungen bei von ihnen abhängigen Prozessen. Abweichungen sind in diesem Zusammenhang insbesondere Qualitäts-, Kosten- und Terminabweichungen. Negative Qualitätsabweichungen sind nicht akzeptabel und führen automatisch zu zusätzlichen Aufwänden in Form von Kosten und Zeit. Reine Kostenüberschreitungen stellen ein großes Problem dar, führen aus Produktionssicht jedoch zunächst zu geringeren Konsequenzen als Terminabweichungen¹⁹⁹. Wird ein Produktionsprozess früher als in der Terminplanung angenommen beendet, so warten die früher frei werdenden Bauproduktionsfaktoren im schlimmsten Fall auf weitere „Beschäftigung“ und die erzeugten Zwischenprodukte warten auf Beginn des folgenden Produktionsprozesses²⁰⁰. Wird ein Produktionsprozess später als geplant fertig, so behindert er alle von ihm direkt abgängigen Produktionsprozesse und gefährdet die termingerechte Fertigstellung dieser, was zu einer Fortpflanzung der negativen Auswirkungen führen kann²⁰¹. Da die Transformationssicht diese Abhängigkeiten nicht ausreichend berücksichtigt, ist sie isoliert angewendet ungeeignet (vgl. (Ballard 2000c) und (Koskela 2000)).

Der Ansatz von Lean Management im Bauwesen ist die „Akzeptanz“ von Ungenauigkeit bis zu einem gewissen Grad und der Begegnung dieser mit ausreichend Flexibilität bzw. Integration der Projektbeteiligten sowie die kontinuierliche Verbesserung der Planung. Beispielsweise werden Produktionsprozesse im Voraus nur mit einer gewissen Genauigkeit geplant, um die Flexibilität für evtl. eintretende Änderungen aufrecht zu erhalten²⁰². Das Ziel ist, Entscheidungen so spät wie möglich und so früh wie notwendig zu treffen. Hieraus folgt, dass ein Maximum an Flexibilität erhalten bleibt. Möglich ist dies allerdings nur, wenn das Bauproduktionsplanungs- und Bauproduktionssteuerungssystem (BPPS) hierfür geeignet ist²⁰³. Im Zentrum steht die Optimierung des Projekts aus ganzheitlicher Sichtweise. Da bisherige Ansätze jedoch nicht in der Lage sind, die Komplexität eines realen Projekts ganzheitlich abzubilden, steht die Erfahrung der Projektbeteiligten bei LMB als zentrale Lösungskomponente im Fokus. Damit dieses Wissen zugänglich ist, ist es erforderlich, die jeweiligen Personen in die Planung zu involvieren (vgl. das LPS in Kapitel 2.4.5).

¹⁹⁹ Kosten sind „Wirkung“ und nicht „Ursache“. Kosten entstehen zwangsweise und können nicht gesteuert werden, gesteuert werden können nur Prozesse.

²⁰⁰ d.h. geringe Auslastung ist die Folge.

²⁰¹ Dieses Phänomen kann zu einem „Aufschaukeln“ der Verzögerungen führen, wenn mehrere Nachfolgerprozesse davon betroffen sind. In der Logistik ist dieses Phänomen unter dem Namen „Bullwhip-Effekt“ bekannt (vgl. (Forrester 1961)). Eine mögliche Lösung wäre, Zeitpuffer vorzusehen, die eine termingerechte Fertigstellung garantieren. Die Folge wäre jedoch eine längere Fertigungsdauer.

²⁰² Sonntag und Hickethier schreiben hierzu: „Dies widerspricht dem bisherigen Ansatz des Projektmanagements, der aus detaillierter Vorausplanung, Kontrolle der Abläufe sowie Anwendung von Gegenmaßnahmen für Abweichungen besteht.“ (Sonntag & Hickethier 2010).

²⁰³ Chou schreibt hierzu passend: „The ability to influence project cost is the highest at the earliest stages, when scope is being defined. As commitments are made, that ability declines over the entire project delivery period.“ (Chou 2009)

Die traditionelle Herangehensweise der Bauproduktionsplanung gleicht einer analytischen - separierbaren - Dekomposition von Sachverhalten unter der Bedingung oder Annahme von Sicherheit (vgl. (Koskela & Howell 2002)). Der Ansatz von Lean Management geht weiter und integriert sowohl die prozessorientierte Sichtweise unter der Akzeptanz von Unsicherheiten - die einem holistischen Ansatz entspricht - als auch die Zielausrichtung auf die durch den Kunden definierte Wertevorstellung. D.h. in den Worten von Koskela (vgl. Kapitel 2.5) fokussiert die herkömmliche Herangehensweise die "Transformation" und löst diese auch, isoliert betrachtet, optimal. Produktion besteht jedoch aus unzähligen - zeitlich hintereinander stattfindenden - Interaktionen, die einer gewissen Unsicherheit unterliegen ("Flusstheorie")²⁰⁴. Des Weiteren stellt sich bei dem Auswahlverfahren unterschiedlicher Möglichkeiten (z.B. bezgl. der Ausführungsvariante oder des Designs) die Frage der Bewertung ("Theorie der Wertschöpfung").

Zudem ist fraglich, ob die Kosten eine geeignete Optimierungsgröße darstellen. Kosten sind nur eine mögliche Optimierungsgröße - insbesondere aus Sicht der Theorie der Wertschöpfung - und falls Kosten als Optimierungsgröße gewählt werden, ist die Komplexität der Begrifflichkeit der Kosten zu beachten²⁰⁵. Zur Planung und Steuerung einer Produktion sind Kosten allein nicht geeignet, vielmehr muss ein geeignetes Kennzahlensystem, das aus einer Verknüpfung mehrere Kennzahlen besteht, verwendet werden (vgl. (Ott 2007), (Goldratt & Cox 2004) und (A. Schmidt & M. Schneider 2007)). Bei der Wahl dieser Kennzahlen ist wiederum sicherzustellen, dass diese auch persistent²⁰⁶ und prognosefähig²⁰⁷ sind (vgl. (Mauboussin 2012)). Des Weiteren ist es notwendig, die eingesetzten Kennzahlensysteme anzupassen, damit sie mit durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen konsistent sind (vgl. (Hopp & Spearman 2011)).

Ein wesentliches Problem ist auch, die Realität auf ein Modell - alle Pläne basieren letztlich auf modellhaften Vorstellungen - zu übertragen und dabei alle relevanten Variablen zu berücksichtigen²⁰⁸. Chong et al. (2011) kommt in diesem Zusammenhang zu dem Ergebnis, dass nur eine gewisse Detaillierung bzw. Genauigkeit in der Planung erforderlich ist. Die Planungswerte müssen nicht exakt sein, sondern realistisch und verlässlich²⁰⁹.

Da es sich bei Bauprojekten um komplexe Systeme handelt (vgl. z.B. (Fernández-Solís 2007) und (Gollenbeck-Sunke & Schultmann 2010)), ist ein möglicher Ansatz durch gezieltes Management der Komplexität die Variabilität der Bauproduktionsprozesse zu minimieren und diese somit besser

²⁰⁴ Fernández-Solís schreibt hierzu passend bei einer Interpretation von Koskela und Kagioglou's (Koskela & Kagioglou 2005): "The thing-oriented view leads to analytical decomposition, the requirement or assumption of certainty and a historical-philosophical approach. On the other hand, the process-oriented view is related to a holistic orientation, acknowledgement of uncertainty and to a historical and contextual approach" (Fernández-Solís 2007)

²⁰⁵ Für die Differenzierung des pagatorische und wertmäßiger Kostenbegriff siehe (E. Heinen 1991).

²⁰⁶ d.h. das Ergebnis einer bestimmten Aktion ist immer wieder ähnlich.

²⁰⁷ d.h. es gibt feste Ursachen und Wirkungen.

²⁰⁸ Chu et al. schreibt hierzu im Zusammenhang bzgl. der Modellierung komplexer Systeme: "Perhaps the first limitation that comes to mind is the mapping of the real system onto the model system: often it is difficult to measure all relevant parameters accurately or to properly understand the dynamical interconnection of certain variables..." (Chu et al. 2003)

²⁰⁹ "Scheduling tools should apply only the less complicated statistical and simulation techniques. It is impossible to collect sufficient and reliable information to comply with the requirements of the more advanced techniques. The designers found that many values generated by these techniques did not mean anything to them and noted that schedules do not need to be accurate, just realistic and reliable. The more advanced statistical and simulation techniques help improve the accuracy of models; however, most project schedules do not require this kind of accuracy." (Chong et al. 2011)

steuerbar zu machen. Dieser Ansatz beruht im Wesentlichen auf der Annahme, dass die Variabilität von Prozessen eine der Hauptquellen für:

- Intransparenz,
- hohe Verschwendungsanteile,
- geringe durchschnittliche Auslastungen,
- Wartezeiten,
- langen Durchlaufzeiten,
- dem Wechsel zwischen Überlastung und Leerläufen von Produktionsfaktoren und
- Termin-, Kosten- und Qualitätsabweichungen

ist. Dieser Ansatz ist einer der Hauptthemen von Lean Management (vgl. (Rother & Shook 2004), (Rother & Harris 2006), (Smalley 2005), (Womack & Jones 2003), (Ohno 2009)) und Lean Management im Bauwesen (vgl. (I. D. Tommelein et al. 1999), (Ballard 2000c), (Koskela 2000), (Gehbauer & Kirsch 2006) und (Heidemann 2010)).

Unter der traditionellen Bauproduktionssteuerung ist insbesondere die Projektsteuerung zu verstehen. Das klassische Thema der Projektsteuerung ist die Überwachung und Steuerung der Termine, Kosten und Qualität. Das wesentliche Ziel, ist Abweichungen von der Planung zu erkennen und basierend auf diesen Steuerungsmaßnahmen zu formulieren und umzusetzen (vgl. (Börkircher 2011)). Mit Hilfe der "Work Breakdown Structure" (WBS) werden die Projektziele hierzu in einzelne kontrollierbare Teilaufgaben gegliedert (vgl. (PMBOK 2008)). Gemäß dem Ansatz der Kybernetik im Bauwesen, werden hierzu bestimmte Soll-Vorgaben für einen Prozess definiert, die anschließend mit den real erreichten Ist-Daten verglichen werden (vgl. Abbildung 3-12). Werden Abweichungen erkannt, müssen passende Steuerungsmaßnahmen identifiziert, bewertet und umgesetzt werden. Falls die Planvorgaben durch keine geeignete Maßnahme erreicht werden können, ist die Planung (welche den Soll-Vorgaben entspricht) anzupassen (d.h. z.B., dass Fertigstellungstermine verschoben werden müssen).

Der Projektstatus wird z.B. anhand der sog. "Earned value analysis" bewertet. Die "Earned value analysis" stellt einen Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Kosten und dem Projektfortschritt dar. Als Referenzwert wird die Basiskalkulation herangezogen. Mit Hilfe der Basiskalkulation können für die einzelnen Teile der WBS Kostenbudgets abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufs der WBS wird somit ermittelt, welche aufsummierten Plankosten zu welchem Zeitpunkt entstehen (Soll-Kosten für Soll-Leistung). Die geplanten Kostenbudgets für abgeschlossene Teilleistungen (Soll-Kosten für Ist-Leistung) werden mit den tatsächlich hierfür entstandenen Kosten verglichen (Ist-Kosten für Ist-Leistung). Hieraus lässt sich feststellen, ob das Projekt (oder Teilprojekt) aus Sicht der Kosten nach Plan verläuft. Zur Analyse bezüglich der Einhaltung des Terminplans ist es erforderlich, den geplanten Kostenverlauf (Soll-Kosten für Soll-Leistung) zu einem bestimmten Stichtag mit den geplanten Kosten für abgeschlossene Teilleistungen (Soll-Kosten für Ist-Leistung) zu vergleichen. Hieraus lässt sich beurteilen, ob das Projekt (oder Teilprojekt) bezüglich des Terminplans nach Plan verläuft.

Die traditionelle Bauproduktionssteuerung besteht im Wesentlichen in der Umsetzung der in der Bauproduktionsplanung erstellten Pläne. Aufträge werden gemäß den Planunterlagen erteilt und auf Abweichungen reagiert (vgl. (Koskela & Howell 2002) und (Girmscheid 2007d)).

Die traditionelle Produktionssteuerung basiert somit auf drei Theorien: strikte Orientierung der Ausführung an der Planung, Bildung von isolierten Arbeitspaketen und dem kybernetischen Regelkreis²¹⁰ (vgl. (Koskela & Howell 2002) und (Formoso & Isatto 2009))²¹¹.

Ähnlich der traditionellen Herangehensweise in der Bauproduktionsplanung ist die Herangehensweise bei der traditionellen Bauproduktionssteuerung stark an dem Transformationsprinzip (vgl. 2.5) orientiert (vgl. (Ballard 2000c))²¹².

Problematisch am Einsatz der "Earned value analysis" ist, dass ein Projekt gegenüber der Einhaltung der einzelnen Kostenbudgets und bezüglich der Kostenentwicklung nach Plan verläuft, jedoch in Realität nicht die vom Kundenprozess benötigten Arbeiten zur richtigen Zeit in der richtigen Weise verfügbar sind (vgl. (Ballard 2000c))²¹³. Auch bei der Dimensionierung der Kostenbudgets können leicht Fehler entstehen, da z.B. bestimmte Arbeiten mehreren Kostenträgern²¹⁴ zugehören können²¹⁵. Hinzu kommt erneut die Komplexität des Kostenbegriffs (d.h. „handelt es sich um pagatorische oder wertmäßige Kosten?“ (vgl. (E. Heinen 1991))). Des Weiteren unterliegen die erzielbaren Angebotspreise den aktuellen Marktsituationen, so dass die Plankosten teilweise schon von Beginn an nicht erreichbar sind²¹⁶. Alle finanziellen Bewertungsmethoden haben außerdem das Problem, dass sie den Stand der Produktion zeitverzögert darstellen, da sie auf die Entstehung der Kosten „warten“ müssen (vgl. (Bassioni et al. 2004))²¹⁷. Besonders kritisch ist an der "Earned value analysis" letztlich die ihr unterliegende Logik, dass Leistung in Geldeinheiten pro Zeit bewertet werden kann.

Ein wesentliches Problem der herkömmlichen Terminsteuerung ist, dass die Aktualisierung der Terminpläne häufig unregelmäßig und in zu großen Zyklen stattfindet (vgl. (Freundt et al. 2004)). Eine Ursache für die häufig notwendigen Anpassungen der Terminpläne ist deren geringe Zuverlässigkeit²¹⁸.

²¹⁰ vgl. Kapitel 3.3.

²¹¹ Russell et al. Schreiben hierzu: „...standard control techniques are used that typically involve a comparison of actual to estimates values; corrections are made if significant deviations exist. This approach assumes that if the actual values are close to the planned values, the project will achieve a successful outcome. The current approach has the following limitations: (1) the comparison is only as good as the estimated values for cost and schedule; (2) there is no certainty or prediction of achieving a successful outcome; and (3) normally only a few key variables are monitored.“ (Russell et al. 1997)

²¹² Ballard schreibt in diesem Zusammenhang über die herkömmliche Herangehensweise in der Projektsteuerung: "The objective is to divide the work to be done in the project into parts so they can be monitored and controlled." (Ballard 2000c)

²¹³ Girmscheid stellt hierzu eine umfassendes holistisch kybernetisches Kostensteuerungsmodell in (Girmscheid 2007b) und (Girmscheid 2007c) vor. Er orientiert sich hierbei sehr stark am in der Baubranche vorliegenden Kostenbudgetdenken und schreibt: "Die Verfolgung der Gewerkebudgets ist die Hauptaufgabe der bauherrnseitigen Kostensteuerung in der Bauphase" (Girmscheid 2007c). Das Problem an diesem stringenten Budgetdenken ist, dass aus Projektsicht eine Überschreitung einzelner Budgets sinnvoll sein kann, wenn bei anderen Kostenbudgets entsprechende Einsparungen erreicht werden können, d.h. unterstellt wird Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Budgets, die Realität ist allerdings eine andere. Problematisch ist in diesem Zusammenhang allerdings das klassische Vergütungsmodell - insbesondere bei öffentlichen Ausschreibungen -, das solche Einsparungen bisher nicht ermöglicht.

²¹⁴ Als Kostenträger könnte in diesem Zusammenhang ein bestimmter Abschnitt eines Gebäudes dienen.

²¹⁵ Ein Beispiel wären die Beschaffungskosten für eine Baumaschine. Werden diese den Einzelkosten der Teilleistungen zugerechnet und entsprechend aufgeteilt oder sogar den Gesamtkosten der Baustelle - und dienen dann im späteren Verlauf doch wiederum nur zur Erstellung weniger Arbeitsobjekte?

²¹⁶ Dies gilt allerdings nicht, falls eine separate Arbeitskalkulation erstellt wird und diese als Grundlage zur Ermittlung der Plankosten herangezogen wird.

²¹⁷ Bassioni et al. schreiben hierzu: „The main problem lies in the fact that financial information is lagging, in the same sense that it describes the outcome of managerial actions/decisions after they occur by least one report period. However, managers need current, up-to-date, and mostly nonfinancial information to be able to take better decisions/actions.“ (Bassioni et al. 2004)

²¹⁸ Die geringe Zuverlässigkeit der Terminpläne resultiert aus der Erstellungsmethode. In der Regel werden Terminpläne von einer hierarchisch übergeordneten Instanz erstellt ohne Berücksichtigung derjenigen Personen,

Durch eine unsichere und veraltete Terminplanung entstehen falsche Soll-Vorgaben für die Produktionssteuerung.

Das Thema Qualitätssteuerung ist in der herkömmlichen Bauproduktionssteuerung im Wesentlichen auf die Einhaltung von vertraglich bestimmten Dimensionen (Mengen, Genauigkeit, Oberflächenzustand usw.) beschränkt. Ein konsequenter kontinuierlicher Abgleich mit Kundenwünschen findet im Allgemeinen nicht statt (dies gilt im Übrigen auch für die traditionelle Planung). Der Kunde definiert zu Beginn das vertragliche Bausoll inklusive der einzuhaltenden Dimensionen, eine Anpassung findet in der Regel - abgesehen von herkömmlichen Nachträgen - nicht statt.

Insgesamt fokussiert sich die traditionelle Bauproduktionssteuerung auf die Kontrolle der im Terminplan vorgegebenen - auf Prognosen basierenden - Ergebnisse und die reaktive Einflussnahme bei auftretenden Abweichungen²¹⁹, eine wie in der stationären Industrie (pro)aktive Steuerung findet in der Regel nicht statt (vgl. (Ballard 2000c) und (Schmitt 2008b))^{220 221}. Eine aktive Produktionssteuerung kontrolliert nicht nur End- und Zwischenergebnisse, sondern beteiligt sich aktiv und kontinuierlich an der Wertschöpfung (vgl. (Ballard & Howell 2003)). Wie wichtig z.B. ein stringentes Anforderungsmanagement ist, kann qualitativ anhand des von Girmscheid aufgestellten generischen, axiomatischen Anforderungsmanagement-Modells (GAAM-Modell) beurteilt werden (vgl.(Girmscheid 2006))²²².

Ein wesentlicher Unterschied in der Bauproduktionssteuerung nach den Lean Methoden ist die Anwendung des sog. Pull-Prinzips²²³ (vgl. (Ballard 2000c)). Innerhalb des LPS-Systems wird das Pull-Prinzip insbesondere durch die Verbindung der Phasen- und Vorschauplanung initiiert²²⁴ (vgl. Kapitel 2.4). Zentrale Aufgabe der gemeinsam mit allen "Stakeholdern"²²⁵ erstellten Phasenplanung ist es, die vom Phasenende rückwärtsgerichtete Planung (d.h. Pull der Tätigkeiten vom Fertigstellungszeitpunkt der jeweiligen Phase), zu erstellen, Schnittstellen zu identifizieren und etwaige vorhandene Zeitpuffer so zu allokalieren, dass diese geeignet sind, um Prozessvarianzen abzufangen (vgl. (Ballard & Howell 2003), (Howell & Macomber 2002)). Nur Tätigkeiten, die unter den aktuellen Randbedingungen umsetzbar sind, dürfen in die Vorschauplanung übernommen werden (vgl. (Ballard 2000c)). Ziel der Vorschauplanung ist es, die Ausführung von Tätigkeiten durch das Schaffen notwendiger Voraussetzungen (Einhaltung von Richtlinien, Erfüllung von Vorbedingungen und Bereitstellung von Kapazitäten) zu ermöglichen (vgl. (Howell & Macomber 2002)). Nur Tätigkeiten, die ausführbar sind und für die alle Voraussetzungen erfüllt wurden, dürfen die Vorschauplanung verlassen. Des Weiteren

die später an der Ausführung beteiligt sind (Hieraus folgt des Weiteren, dass Kostenpläne ebenfalls einer geringen Zuverlässigkeit unterliegen). Des Weiteren spielt es eine Rolle wie weit im Voraus geplant wurde (vgl. Kapitel 5.1.3.2).

²¹⁹ Und diese Einflussnahme beschränkt sich in der Realität häufig auf Mahnungen.

²²⁰ Eine Ursache hierfür ist erneut das Verständnis von Bauproduktion als reinen Transformationsprozess (vgl. Kapitel 2.5.).

²²¹ Ballard und Howell schreiben hierzu: "...In other words, we understand the problem in terms of a missing piece and failed to understand that production control was missing because there was no place for it in traditional project management thinking." (Ballard & Howell 2003)

²²² Anforderungsmanagement bedeutet in diesem Zusammenhang insbesondere die notwendigen Informationen und Entscheidungen bezüglich einer Ausführung zu koordinieren. Da Anforderung sowohl die Planungs- als auch Steuerungsebene betreffen, gilt entsprechendes auch für die Bauproduktionsplanung.

²²³ vgl. Kapitel 2.3.

²²⁴ Ballard schreibt hierzu: "...pulling allows material or information into a production process only if the process is capable of doing that work. In our Last Planner system, conformance of assignments to quality criteria constitute such a check on capability. Further, making assignments ready to look ahead process is explicitly an application of pull techniques." (Ballard 2000c)

²²⁵ Der Begriff "Stakeholder" verkörpert alle Personen oder Gruppen, die ein berechtigtes Interesse am Verlauf der Ergebnisse des LPS haben (z.B. Bauherren, Lieferanten, Bauausführung, usw.).

werden unabhängig ausführbare Tätigkeiten identifiziert, die als Puffer gegenüber Prozessvarianzen dienen (vgl. (Hamzeh et al. 2008)). Während der herkömmliche Ansatz der Bauproduktionssteuerung auf einer Umsetzung der möglichst detaillierten und sukzessiv erstellten Bauproduktionsplanung basiert, setzt das Pull-Prinzip auf die Gestaltung der Kopplung zwischen einzelnen Produktionsprozessen. Anstatt genau weit im Voraus zu planen und die Produktionsprozesse zu einem bestimmten Termin zu beginnen - und zu beenden -, verzichtet das Pull-Prinzip auf eine (zu)detaillierte langfristige Planung und konzentriert sich auf eine Auftragsfreigabe²²⁶, die anhand des real auftretenden Bedarfs des Nachfolgeprozesses ausgelöst wird. Da im Bauwesen anders als in der stationären Industrie die Produktionsprozesse nicht statisch miteinander verbunden sind - sogar physisch häufig erst vorhanden sind, wenn der Vorgängerprozess seine Arbeiten abgeschlossen hat -, keine fertigen Zwischenprodukte aus einem Lager genommen werden können - die Zwischenprodukte sind meist ortsgebunden - und eine komplexe Netzwerkstruktur zwischen den Bauproduktions-prozessen besteht, kann das Steuerungssignal (der sog. Pull) meist nur durch den Terminplan erfolgen²²⁷. Der wesentliche Unterschied im LPS ist die Art und Weise der Erstellung dieses Terminplans. Es handelt sich um keinen langfristig von einzelnen Personengruppen detailliert erstellten Terminplan, sondern um ein stringentes Konzept, dass aus mehreren Phasen besteht (vgl. Kapitel 2.4) und möglichst viele Stakeholder integriert²²⁸. Die Kombination aus Phasen-, Vorschau- und Wochen- bzw. Tagesplanung ermöglicht die Umsetzung des Pull-Prinzips. Durch gemeinsame Ausdifferenzierung und anschließende Verdichtung und Sortierung der Abläufe entsteht während der Phasen- und Vorschauplanung ein Terminplan, der gleichzeitig als Pull-Signal dient.

Als weiterer wesentlicher Unterschied ist festzustellen, dass in einem BPPS nach den Lean Management Prinzipien die Ursachen von Planabweichungen stringent analysiert und verfolgt werden. Gleichzeitig wird kein Zustand (sei er auch von den Zahlen her optimal) als Optimalzustand angesehen²²⁹.

Aus den obigen erläuterten Punkten ergibt sich der Bedarf, die traditionelle Bauproduktionsplanung und -steuerung zur hinterfragen. Lean Management im Bauwesen adressiert die aufgezählten Kritikpunkte und sucht nach Ansätzen, die zu einer besseren Bauproduktionsplanung und -steuerung führen.

Zentrale Ansätze im Lean Management im Bauwesen (LMB) sind die Themen:

- Vermeidung von Verschwendung,
- Vermeidung von Variabilität und
- das Pull-Prinzip,

wobei die Methode des Last Planner Systems diese Punkte aufgreift und durch gezielte Planung und -steuerung versucht, diese Themen in der Bauproduktion umzusetzen.

Das nächste Kapitel widmet sich der genaueren Analyse der Wirkungsmechanismen von LMB.

²²⁶ Zur Erläuterung siehe (M. Schmidt 2007).

²²⁷ z.B. damit Produktionsprozess B nächste Woche starten kann, benötigt er einen bestimmten Fertigstellungsgrad von A.

²²⁸ Die Wichtigkeit der Integration und Berücksichtigung der einzelnen Stakeholder wird in (Thaller 2002) ausführlich erläutert.

²²⁹ Die kontinuierliche Verbesserung geht davon aus, dass jeder Systemzustand verbessert werden kann.

5 Wirkungsmechanismen einer Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien

In Kapitel 4 wurden bestehende Verbesserungspotentiale der Bauproduktionsplanung und -steuerung für den Fall Erdbau dargestellt. Kapitel 5 baut auf diesen Ergebnissen auf und modelliert die sich hieraus ergebenden Konsequenzen für eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien für konkrete Sachverhalte.²³⁰

In Kapitel 5.1 wird eine weiterführende Analyse einzelner grundlegender Wirkungsmechanismen durchgeführt. Im Anschluss werden in Kapitel 5.2 und 5.3 die daraus abgeleiteten Konsequenzen für eine Prozess- und Flussoptimierung im Einklang mit den Lean Management Prinzipien dargestellt.

5.1 Weiterführende Analyse einzelner grundlegender Wirkungsmechanismen

Kapitel 5.1 ist der vertiefenden Analyse der Wirkungsmechanismen der Ansätze „Minimierung von Verschwendung“, „Minimierung von Variabilität“ und dem „Pull-Prinzip“ gewidmet.

In Kapitel 5.1.1 wird eine umfassende Diskussion über das Thema „Minimierung von Verschwendung“ geführt. Kapitel 5.1.2 stellt den existierenden Zusammenhang zwischen einer Verringerung der Variabilität und der Entwicklung der Auslastung von Bauproduktionsfaktoren dar. Das Kapitel 5.1.3 widmet sich der Analyse des Pull-Prinzips.

5.1.1 Minimierung von Verschwendung

In Kapitel 2.2.2 wurde bereits dargestellt, was unter der Begrifflichkeit „Verschwendung“ in der Domäne Lean Management verstanden wird. Dieses Kapitel bietet eine vertiefende Darstellung des Prinzips „Minimierung von Verschwendung“ und beschreibt, was bei der Umsetzung zusätzlich zu beachten ist.

Während die Anwendung der Prämisse, die Verschwendungsanteile bzw. die "7M" zu verringern eine logisch leicht nachvollziehbar positive Auswirkung auf den Produktionsprozess hat, ist dies bei der Verschwendungsart "Ungleichgewicht" nicht unbedingt der Fall. Der Wirkungszusammenhang von "Ungleichgewicht", „Überlastung“ und den "7M"²³¹ ist etwas komplexer und bisher nicht genau theoretisch analysiert worden. Aus diesem Grund wird dieser Zusammenhang im Folgenden genauer betrachtet.

Interessant an der Verschwendungsart „Ungleichgewicht“ ist zunächst, dass diese auch in der Materialflusslehre eine wesentliche Rolle spielt. Durch Warteschlangentheorie konnte nachgewiesen werden, dass die Auslastung eines Prozesses sowohl von dessen Variationskoeffizient²³² der Bearbeitungszeiten und dem Variationskoeffizient der Abfertigungsrate vom Vorgängerprozess, als

²³⁰ Da einer der zentralen Kritikpunkte an der traditionellen Vorgehensweise die strikte Trennung zwischen Bauproduktionsplanung und Bauproduktionssteuerung (Ausführung) ist, werden diese aus Gründen der Konsistenz nicht in einzelne Kapitel unterteilt.

²³¹ bzgl. der einzelnen Verschwendungsarten siehe Kapitel 2.2.2.

²³² Der Variationskoeffizient bildet das Verhältnis von Standardabweichung und Erwartungswert ab.

auch von der zwischen den zwei Prozessen geplanten durchschnittlichen Anzahl an Zwischenprodukten abhängt²³³ (vgl. (Arnold & Furmans 2009)).

In Bezug auf den Zusammenhang zwischen den sieben Arten der Verschwendung nach Ohno und der Verschwendung „Ungleichgewicht“ kommt die Frage auf, ob „Ungleichgewicht“ eine Folge von den „7M“ ist oder umgekehrt. Die Antwort auf diese Frage ist „sowohl als auch“. Sind Prozesse standardisiert und enthalten einen eliminierbaren Anteil an Verschwendung, so sind deren Erwartungswerte der Bearbeitungsdauer zunächst größer als notwendig. Des Weiteren gilt, unter der Annahme, dass alle Tätigkeiten - auch diejenigen, die unter den Anteil Verschwendung fallen - bezüglich ihrer benötigten Dauern schwanken, dass die Varianz des Gesamtprozesses mit steigendem Anteil an Verschwendungselementen ebenfalls steigt. Gleichzeitig ist Varianz aber eine Ursache für das Entstehen von Verschwendungselementen nach den „7M“, was relativ leicht an der Verschwendungsart „Warten“ nachvollzogen werden kann. So entstehen beispielsweise Wartezeiten, wenn ein Prozess mit unregelmäßigen Bearbeitungszeiten mit einem weiteren Prozess mit unregelmäßigen Bearbeitungszeiten verknüpft wird (vgl. (Arnold & Furmans 2009)).

Der Zusammenhang zwischen Prozessschwankungen und dem Anteil an Verschwendung in Produktionsprozessen lässt sich relativ einfach unter der Annahme von Unabhängigkeit der Dauern aller Tätigkeiten innerhalb eines standardisierten Prozesses nachvollziehen (d.h. es besteht insbesondere Unabhängigkeit zwischen dem Zeitbedarf der wertschöpfenden Prozessanteile und derjenigen, die unter Verschwendung fallen)²³⁴. Hieraus folgt für die Entwicklung der Erwartungswerte:

$$E(t_p) = \sum E(t_{w_i}) + \sum E(t_{v_j}) \quad (5.1)$$

t_{w_i}	<i>Dauer der wertschöpfenden Tätigkeit i [h]</i>
t_{v_j}	<i>Dauer der nicht wertschöpfenden Tätigkeit j [h]</i>
$E(t_p)$	<i>Erwartungswert der Prozessdauer t_p [h]</i>
$E(t_{w_i})$	<i>Erwartungswert der Dauer der wertschöpfenden Tätigkeit i [h]</i>
$E(t_{v_j})$	<i>Erwartungswert der Dauer der nicht wertschöpfenden Tätigkeit j [h]</i>

Für die Entwicklung der Varianz gilt unter Voraussetzung von Unabhängigkeit:

$$Var(t_p) = \sum Var(t_{w_i}) + \sum Var(t_{v_j}) \quad (5.2)$$

$Var(t_p)$	<i>Varianz der Prozessdauer t_p [h]</i>
$Var(t_{w_i})$	<i>Varianz der Dauer der wertschöpfenden Tätigkeit i [h]</i>
$Var(t_{v_j})$	<i>Varianz der Dauer der nicht wertschöpfenden Tätigkeit j [h]</i>

Hieraus folgt des Weiteren, dass, insofern eine Tätigkeit, die der Verschwendung zugeordnet ist, nur dann zu „Ungleichgewicht“ führt, wenn sie bzgl. ihres Zeitbedarfs schwankt. Allerdings hat

²³³ Da ein Prozess immer von dem Output des Vorgängerprozesses abhängt muss man diese Aussage mathematisch anhand von vernetzten Systemen untersuchen (vgl. (Arnold & Furmans 2009)).

²³⁴ Ein Beispiel soll diesen Sachverhalt erläutern: Unter anderem wäre damit der Zeitbedarf für das Lösen & Laden von Material mit einem Bagger unabhängig von dessen Wartezeit auf einen LKW. Natürlich könnte an dieser Stelle angemerkt werden, dass ein Baggerfahrer, der aufgrund langer Wartezeit erholt ist, eine höhere kurzfristige Spitzenleistung erbringen kann als einer, der kaum Wartezeiten hat. Es wird an dieser Stelle unterstellt, dass dieser Zusammenhang vernachlässigbar ist.

„Ungleichgewicht“ immer zur Folge, dass Verschwendung im Sinne der „7M“ entsteht. Beispielsweise haben schwankende Auslastungsgrade unweigerlich entweder Wartezeit oder Lagerbestand zur Folge.

Sowohl muda als auch mura können zur „Überlastung von Mensch oder Maschine“ (muri) führen²³⁵. Dies ist insbesondere bei Schwankungen nachvollziehbar, wenn auf eine Periode des „Wartens“ auf Produkte des Vorgängerprozesses eine Periode des „Überangebots“ folgt und ein knapp bemessener Terminplan eingehalten werden muss.

Aus der Beobachtung, dass die Varianz in Verschwendung zu weiterer Verschwendung führt, kann abgeleitet werden, dass die Standardisierung (d.h. Verringerung der Varianz) von Verschwendung schon eine Verbesserung bedeutet und somit eine Eliminierung von Verschwendung. Es ist zu ergänzen, dass dies wiederum nur gilt, wenn die Standardisierung nicht zu einer Vergrößerung der Erwartungswerte führt.

Unterstellt man stochastisch Abhängigkeit, so gilt für die Berechnung des Erwartungswerts weiterhin obige Berechnung.

Die Entwicklung der Varianz verändert sich allerdings zu:

$$\text{Var}(t_p) = \sum \text{Var}(t_{w_i}) + \sum \text{Var}(t_{v_j}) + \sum \text{Cov}(t_{w_i}, t_{v_j}) \quad (5.3)$$

wobei gilt:

$$\text{cov}(t_{w_i}, t_{v_j}) = E(t_{w_i} \times t_{v_j}) - E(t_{w_i}) \times E(t_{v_j}) \quad (5.4)$$

$\text{cov}(t_{w_i}, t_{v_j})$ Kovarianz der Summen von t_{w_i} und t_{v_j}

Man kann erkennen, dass die Entwicklung der Varianz im Fall für stochastische Abhängigkeit in drei Fälle unterschieden werden kann:

1. Falls $\sum \text{Cov}(t_{w_i}, t_{v_j}) > 0$ gilt, ist die Varianz größer als bei statistischer Unabhängigkeit
2. Falls $\sum \text{Cov}(t_{w_i}, t_{v_j}) = 0$ gilt, ist die Varianz gleich groß wie bei statistischer Unabhängigkeit
3. Falls $\sum \text{Cov}(t_{w_i}, t_{v_j}) < 0$ gilt, ist die Varianz kleiner als bei statistischer Unabhängigkeit

Da in den Fällen 1. und 2. die Varianz größer oder gleich groß ist als bei statistischer Unabhängigkeit, gilt für diese Fälle unbedingt die Varianz durch Standardisierung zu verringern und dabei den Erwartungswert der betroffenen Tätigkeit nicht zu vergrößern.

Im 3. Fall verringert sich die Varianz eines Prozesses durch die "Überlagerung" der einzelnen Schwankungen. Ein Beispiel für diese Art der Entwicklung wäre, wenn eine Verlängerung einer Tätigkeit A1 innerhalb von Prozess A zu einer Verkürzung einer Tätigkeit A2 führt, z.B. eine bessere Kontrolle, die länger dauert, führt zu einer kürzeren Nachbearbeitungszeit. Ein wesentliches Problem ist hierbei allerdings, dass bei Einführung einer standardisiert längeren und besseren Kontrolle der

²³⁵ bzgl. Der Begrifflichkeiten muda, muri und mura siehe Kapitel 2.2.

Erwartungswert für die Kontrolle steigen würde. Hieraus folgt, dass es eine Art "trade-off"²³⁶ zwischen Standardisierung und der Entwicklung von Varianz gibt. Im Wesentlichen handelt es sich um zwei Alternativen, diese sind:

- 1 Realisierung eines kleineren Erwartungswerts der Bearbeitungszeiten mit größerer Varianz, oder
- 2 Realisierung eines höheren Erwartungswerts der Bearbeitungszeiten mit geringerer Varianz.

Die zwei Alternativen für den 3. Fall sind in Abbildung 5-1 abgebildet.

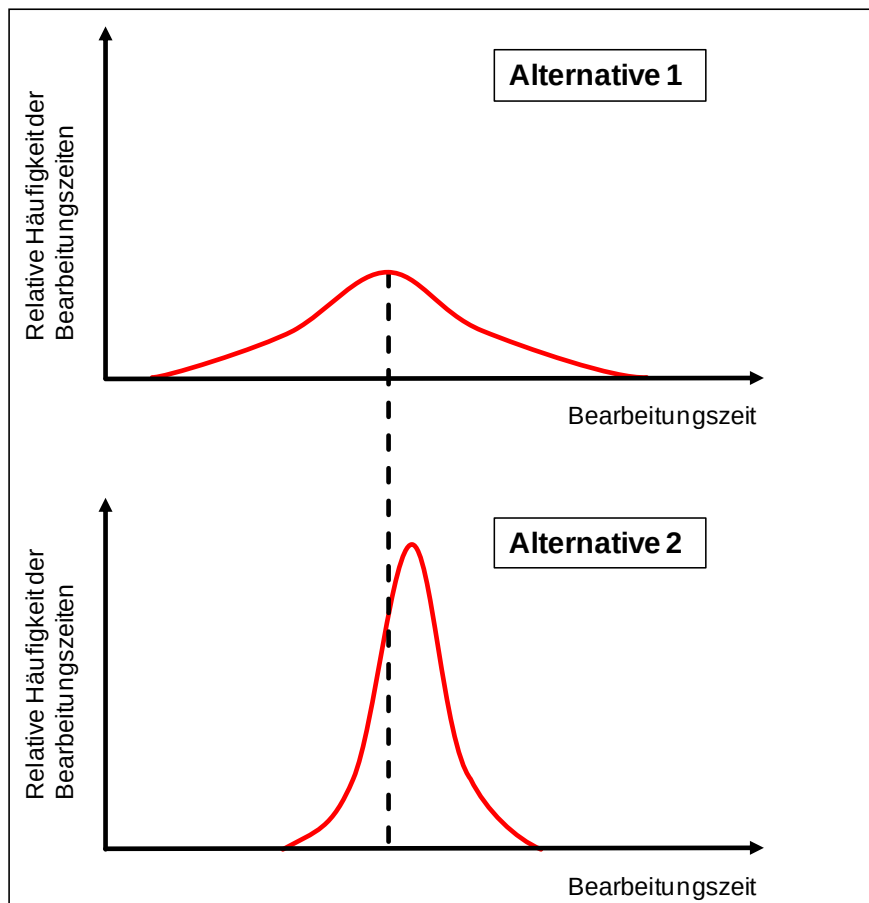


Abbildung 5-1: Zwei Alternativen für Fall 3

Nicht in allen Fällen ist es besser, Alternative 1 mit dem geringeren Erwartungswert zu wählen. Bei mehreren aufeinander folgenden Produktionsprozessen, ist der resultierende Variationskoeffizient des Gesamtprozesses deutlich größer bei Alternative 1. Ein Problem entsteht hierbei insbesondere bei der Planung und Auslegung von Folgeprozessen. Des Weiteren sind bei größeren Variationskoeffizient größere Puffer zwischen Prozessen notwendig, um eine gleichmäßige und hohe Auslastung zu erreichen (vgl. (Arnold & Furmans 2009)).

Ein fiktives Beispiel soll diesen Zusammenhang verdeutlichen:

- Ein LKW entlädt Erdmaterial für einen Dozer. Die Verteilzeit des Dozers hängt vom Entladeort des LKW ab, je näher das Material an der späteren Stelle des Einbaus entladen wurde, desto geringer ist die sich ergebende Verteilzeit (es herrscht somit Abhängigkeit).

²³⁶ Der Trade-off ist in diesem Zusammenhang die Differenz zwischen dem, was man bei Wahl einer Handlungsalternative als Nutzen gewinnt, und dem Nachteil, den man dafür in Kauf nehmen muss.

1. Nimmt der LKW-Fahrer sich keine Zeit und entlädt das Material an einer für ihn günstigen Stelle (geringer Erwartungswert und Standardabweichung), so benötigt der Dozer-Fahrer länger zum Verteilen und die Schwankung der Verteilzeiten nimmt zu (hoher Erwartungswert und Standardabweichung).
2. Nimmt der LKW-Fahrer sich hingegen mehr Zeit (höherer Erwartungswert, bei annähernd identischer Standardabweichung²³⁷) und lädt das Material an einer für den Dozer günstigeren Stelle, so benötigt der Dozer-Fahrer weniger Zeit für den Verteilvorgang und die Schwankungen nehmen ebenfalls ab (niedrigerer Erwartungswert und niedrigere Standardabweichung).

Je nachdem, wie groß der sich ergebende Erwartungswert des Gesamtprozesses für Abladen und Verteilen ausfällt und wie groß die sich ergebende Varianz ist, ist zu entscheiden welche Alternative die bessere ist. Neben der reinen Entwicklung der Zeiten, stellt sich insbesondere auch die Frage nach dem System-Engpass. Ist der Dozer der Engpass, so wäre es günstig, wenn die LKW nahe der Einbaustelle abladen. Sind die LKW der Engpass, so könnte es aus Systemsicht günstig sein, dass Variante 1 gewählt wird.

Im Bauwesen existieren sowohl stochastisch unabhängige als auch stochastisch abhängige Beziehungen zwischen Tätigkeiten.

Beispiele für stochastisch unabhängige Tätigkeiten:

- Beladedauer der LKW und Fahrzeit der LKW
- Kippzeit²³⁸ der LKW und Verteildauer der Dozer
- Baggerspielzeiten unter gleichen Randbedingungen

Beispiele für stochastisch abhängige Tätigkeiten:

- Beladedauer der LKW und Baggerlöffelinhalt je Baggerspiel (und damit auch gegenüber der Spielzeit des Baggers unter Annahme, dass eine im Durchschnitt längere Spielzeit zu einer höheren Füllmenge führt²³⁹)
- Positionierzeit der LKW beim Entladevorgang und Verteildauer der Dozer
- Kontrolldauer und Nacharbeitsdauer²⁴⁰

Aus Formel 5.3 folgt des Weiteren, dass immer die Summe aller wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten betrachtet werden muss, da der Term $\sum \text{Cov}(t_{w_i}, t_{v_j})$ sich in Abhängigkeit von allen existierenden Werten für i und j entwickelt.

Hieraus folgt, dass in den Fällen, in denen von stochastischer Unabhängigkeit ausgegangen werden kann, direkt eine Verringerung des Erwartungswerts der jeweiligen Dauern und eine Verringerung der

²³⁷ Die Entwicklung der Standardabweichung hängt von der Art und Weise der Durchführung ab. Hier wird angenommen, dass durch geeignete Steuerung quasi keine Zunahme der Standardabweichung erfolgt. Da der LKW in der Regel schneller fahren kann als ein Dozer ist anzunehmen, dass die Standardabweichung in diesem Fall geringer ausfällt.

²³⁸ Nicht zu verwechseln mit dem zuvor dargestellten Beispiel. Hier ist nur der Kippvorgang gemeint, d.h. das Positionieren der LKW vor dem Abkippen ist nicht enthalten.

²³⁹ Wobei hier erneut eine Art „Trade-off“ zwischen schnellen und nicht voll beladenen Baggerspielen und langsamen voll beladenen Baggerspielen existiert.

²⁴⁰ Zur Verdeutlichung: Wenn ein Fehler früher entdeckt wird, durchläuft er weniger Folgeprozesse. Je weniger Folgeprozesse durchlaufen werden, desto geringer ist der Änderungsaufwand bei der Nacharbeitung.

zugehörigen Varianz sinnvoll sind. Gleiches gilt bei stochastischer Abhängigkeit für Kovarianzen, die größer oder gleich Null sind. Im Falle von stochastischer Abhängigkeit und negativen Kovarianzen gilt es den "trade-off" zwischen der Entwicklung des Erwartungswert und der Entwicklung der Varianz zu maximieren.

Generelles Ziel ist es, die Varianz der Prozessdauer t_p und Erwartungswert der Prozessdauer t_p möglichst zu minimieren.

Die Beurteilung, wann welche Alternative gewählt werden sollte, kann durch einen Vergleich der Quantile (z.B. das 0,95 Quantil) der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Prozessdauer t_p erfolgen. Es ist somit leicht nachvollziehbar, dass die Wahl der Alternative von der Akzeptanz der Wahrscheinlichkeit einer Bearbeitungszeitüberschreitung abhängt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Würde man bei den dargestellten Dichtefunktionen zwischen den Alternativen entscheiden, so würde bei Bewertung anhand des $Q_{0,95}$ ²⁴¹ Alternative 2 und bei Bewertung anhand des $Q_{0,75}$ Alternative 1 gewählt werden. Aufgrund der obigen Zusammenhänge ist es immer notwendig, für den Einzelfall zu entscheiden, was sinnvoll ist (vgl. obige Aussage bzgl. Abbildung 5-1)

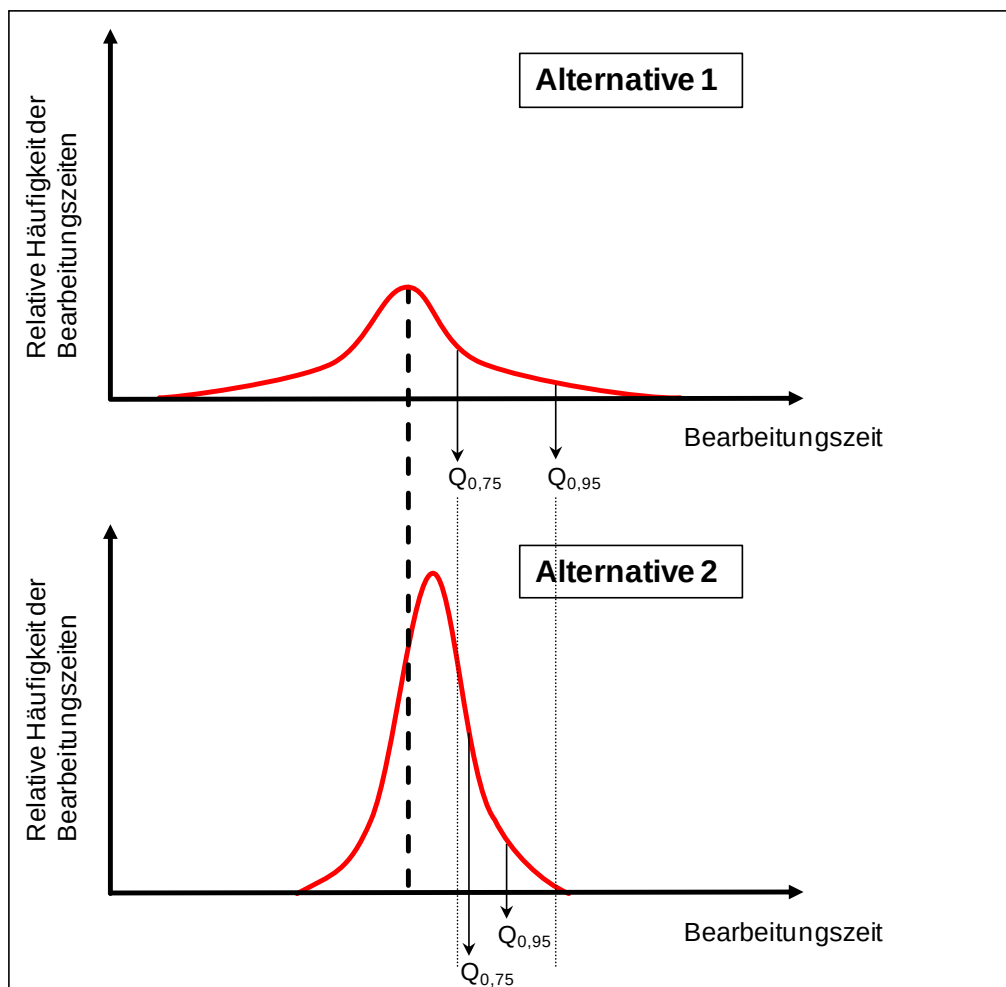


Abbildung 5-2. Quantile als Entscheidungsgrundlage der Alternativen

Neben den bereits festgestellten Zusammenhängen ist ein weiterer wichtiger Punkt zu berücksichtigen: Geht man davon aus, dass Tätigkeiten einen gewissen unteren Grenzwert für ihre Bearbeitungszeiten haben, so kann durch Einführung von Standardisierungen, die in die Nähe dieses Punktes den

²⁴¹ $Q_{0,95}$ = 0,95 Quantil.

Erwartungswert für Bearbeitungszeiten festlegen, eine Veränderung der Verteilung der Bearbeitungszeiten erfolgen (z.B. die Verschiebung von vor Einführung der Standardisierungsmaßnahme normalverteilten Bearbeitungszeit hin zu einer erlang-verteilten Bearbeitungszeiten mit linkslastigem Schwerpunkt). Dies ist evtl. bei der Auslegung der, bezogen auf den betrachteten Prozess, vorgelagerten und nachfolgenden Prozesse zu berücksichtigen. Der Grenzwert für Bearbeitungszeiten hängt hierbei von den in der Produktion befindlichen technischen Ausrüstungen und der Qualifikation des Arbeitspersonals ab. Des Weiteren wird der Erwartungswert und die Standardabweichung sowie der Verlauf der Dichtefunktion durch die Ressourcenallokation beeinflusst (vgl. (Vaziri et al. 2007)).

Auf realen Baustellen wird es kaum möglich sein, den Erwartungswert zu verändern, ohne dabei auch die Varianz zu verändern. Jeder Eingriff in die Produktion wird Konsequenzen - zumindest infinitesimale - für beide Größen haben. Allerdings haben bestimmte Handlungen einen stärkeren Einfluss auf die Varianz und andere einen stärkeren Einfluss auf den Erwartungswert²⁴².

5.1.2 Minimierung von Variabilität²⁴³

Anhand der Ergebnisse des vorherigen Kapitels 5.1.1 kann bereits der Einfluss von Prozessvariabilität grob abgeschätzt werden. In diesem Kapitel wird eine detailliertere Beweisführung zum Nachweis der Vorteilhaftigkeit der Minimierung von Variabilität durchgeführt. Es stellt sich insbesondere die Fragen, welche Auswirkungen Variabilität im Spezialfall Erdbau hat. Hierzu wird im Folgenden die Auswirkung von Prozessvariabilität bei der Auslastung von Baumaschinen dargestellt.

Die Bauproduktionsfaktoren, deren Organisation sowie die auf diese wirkenden Einflüsse sind Quellen für die Variabilität der Leistung der Prozesse. Schwankende Leistungen bedingen eine allgemein 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 nachfolgend gezeigt wird). Damit Prozesse verstetigt werden können, sind jedoch die Quellen der Variabilität zu identifizieren und zu eliminieren bzw. deren Auswirkung zu verringern. Die Leistungsschwankungen eines Bauproduktionsfaktors (vgl. Abbildung 5-3) lassen sich in einem Histogramm darstellen (vgl. Abbildung 5-4).

²⁴² Würde man z.B. einen Hauptprozess um einen diskreten Subprozess erweitern, so hat dies keine Auswirkung auf die Varianz, nur auf den Erwartungswert. Hingegen würde eine Erweiterung um einen schwankenden Subprozess mit flacher Dichtefunktion zu einer überproportionalen Steigerung der Varianz des Hauptprozesses führen. Unterstellt wurde in beiden Fällen, dass die Subprozesse stochastisch unabhängig sind.

²⁴³ Teile dieses Kapitels wurden bereits in (Bregenhorn & Gentes 2012) publiziert.

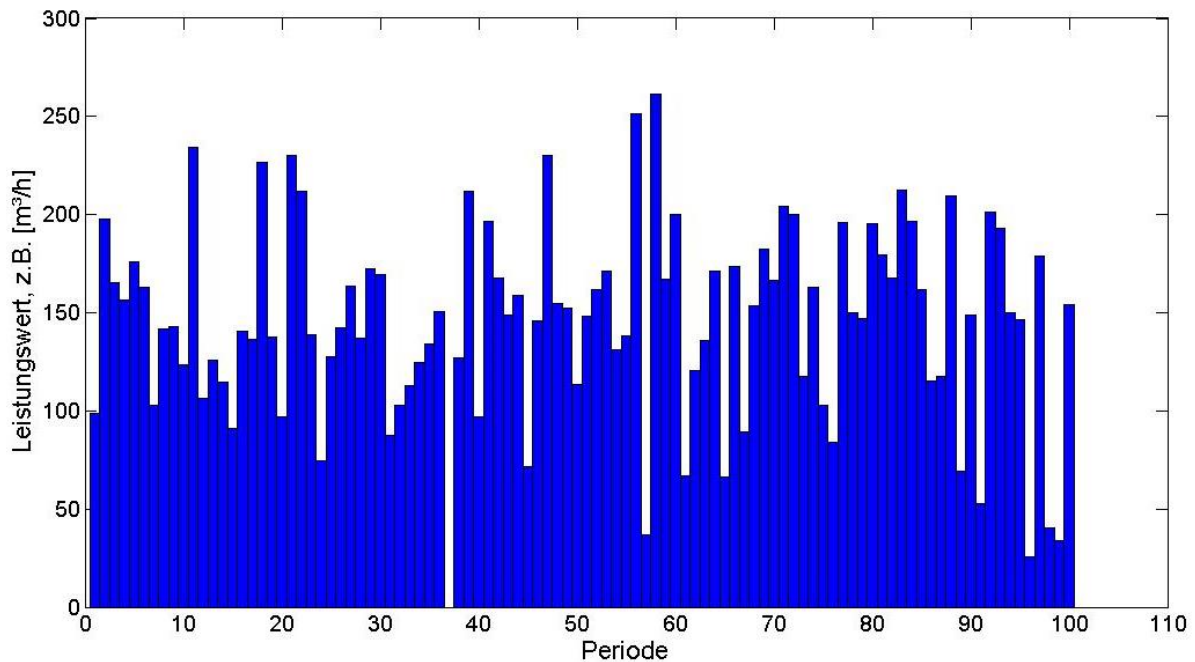


Abbildung 5-3: Unter den jeweiligen Randbedingungen erreichte Leistung eines Bauproduktionsfaktors, Prinzipskizze²⁴⁴

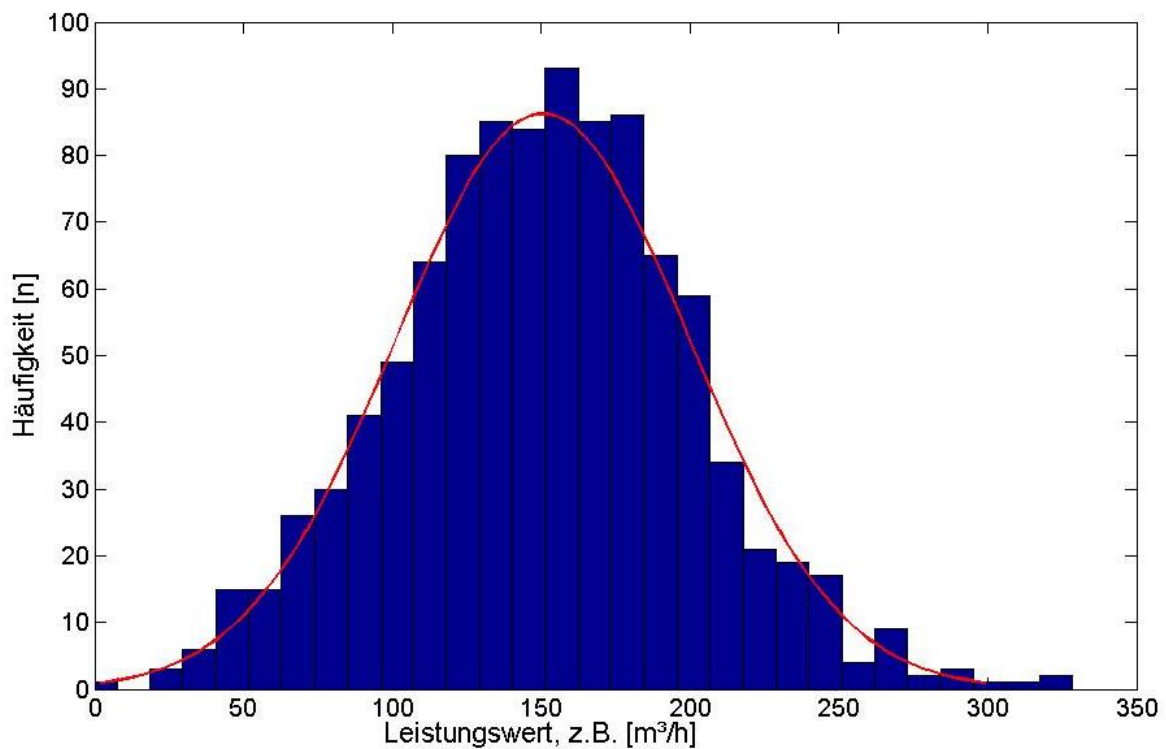


Abbildung 5-4: Histogramm der Leistungswerte aus Abbildung 5-3, Prinzipskizze

²⁴⁴ In Anlehnung an (Hüster 2005). Die Leistungswerte wurden aus normalverteilten Zufallszahlen mit einem Mittelwert von 150 [m³/h] und einer Standardabweichung von 50 [m³/h] generiert.

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

$$v(t) = \frac{\sigma(t)}{\mu(t)} \quad (5.5)$$

$v(t)$	<i>Variationskoeffizient</i>
$\sigma(t)$	<i>Standardabweichung der Leistung [Einheit/h]</i>
$\mu(t)$	<i>Erwartungswert der Leistung [Einheit/h]</i>

Je höher der Variationskoeffizient $v(t)$, desto größer sind die Leistungsschwankungen in Relation zum Erwartungswert $\mu(t)$. Die zeitliche Abhängigkeit t gilt, da die Leistungswerte je nach gewähltem Betrachtungshorizont voneinander abweichen können²⁴⁵.

Bei der Planung wird einem Bauprozess ein bestimmter Leistungsbedarf zugeordnet (d.h. er wird bezüglich seiner Leistungsfähigkeit dimensioniert). Anhand 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. Abbildung 3-6), 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. (Gehbauer 1974)), kann eine Dimensionierung wie folgt durchgeführt werden:

$$GL_D = \mu_V + \sigma_V \times u_y \quad (5.6)$$

GL_D	<i>geplante Leistungsfähigkeit [Einheit/h]</i> <i>Der Index D steht für „zu dimensionieren“</i>
μ_V	<i>Erwartungswert der benötigten Leistungsfähigkeit [Einheit/h]</i> <i>Der Index V steht für Vorgänger</i>
σ_V	<i>Standardabweichung der benötigten Leistungsfähigkeit [Einheit/h]</i>
u_y	<i>Quantil der $N(0,1)$-Verteilung</i>

Die Werte μ_V und σ_V sind aus der Normalverteilung der Leistungserbringung des Vorgängerprozesses des zu dimensionierenden Produktionsprozesses zu bestimmen.

Die geplante Leistungsfähigkeit ist mit der Wahrscheinlichkeit von:

$$y = 1 - \alpha \quad (5.7)$$

y	<i>Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung des Bauprozesses ausreichend ist (im folgenden Servicegrad)</i>
α	<i>Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung des Bauprozesses nicht ausreichend ist</i>

²⁴⁵ Hieraus folgt, dass $\mu(t)$ nur für ein diskretes Zeitintervall mit „exakt“ identischen Randbedingungen gilt.

ausreichend groß, um die benötigte Leistungsfähigkeit zu decken.

Die benötigte Leistungsfähigkeit hängt von der Verknüpfung der betrachteten Gruppe von Bauproduktionsfaktoren ab (d.h. in welcher Abhängigkeit stehen die Bauproduktionsfaktoren zueinander?). In dem hier betrachteten Fall wird eine direkte Abhängigkeit unterstellt (vgl. Kapitel 3.1).

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

$$GL_D = GL_D(t) \quad (5.8)$$

Hieraus folgt für die durchschnittliche Auslastung:

$$\rho_D(\Delta t) = \frac{\mu_V(\Delta t)}{GL_D(\Delta t)} \quad (5.9)$$

$\rho_D(\Delta t)$ durchschnittliche Auslastung des zu dimensionierenden Bauproduktionsfaktors im Zeitabschnitt (Δt) [-]

Δt ist ein diskreter Zeitabschnitt zwischen dem Beginn einer Beobachtung t_{start} und dem zugehörigen Ende der Beobachtung t_{end} .

An dieser Stelle sei deutlich darauf hingewiesen, dass die Leistungsentwicklung in Abbildung 5-3 keine isolierte Größe ist, d.h. die erreichte Leistung hängt insb. von der erreichten Leistung der Vorgängerprozesse ab, da deren Input benötigt wird, damit der betrachtete Prozess seine Arbeiten durchführen kann.

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

$$\rho_D(\Delta t) = \frac{\mu_V(\Delta t)}{\mu_V(\Delta t) + v_V(\Delta t) \times \mu_V(\Delta t) \times u_Y} = \frac{1}{1 + v_V(\Delta t) \times u_Y} \quad (5.10)$$

Für ausgewählte Servicegrade ist dieser Zusammenhang in Abbildung 5-5 dargestellt.

Aus Abbildung 5-5 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.

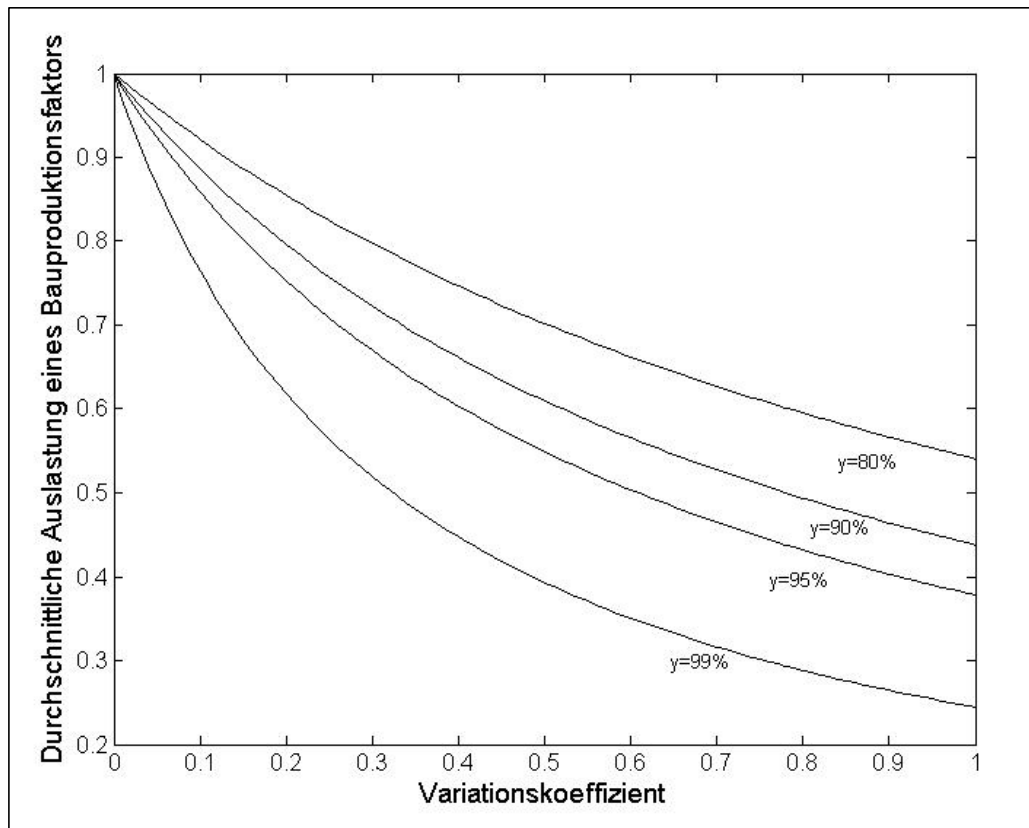


Abbildung 5-5: Erreichbare Auslastung eines Bauproduktionsfaktors für bestimmte Servicegrade y , in Abhängigkeit von des Variationskoeffizienten des Vorgängerprozesses²⁴⁶

Alternativ kann auch die geplante Auslastung und der Servicegrad konstant gehalten werden und eine Verringerung der geplanten Leistungsfähigkeit erfolgen (d.h. der Einsatz eines Bauproduktionsfaktors mit geringerer Leistungsfähigkeit). 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 im Betrieb steigen, entsteht ein Engpass.

Die Schwäche dieses Vorgehens ist, dass angenommen wird, dass der zu dimensionierende Prozess deterministisch ist. Insofern es sich ebenfalls um einen stochastischen Prozess handelt, ist dies bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Als weiteres Kriterium kann somit eingeführt werden, dass der zu dimensionierende Produktionsprozess nur mit einer gewissen vorgegebenen Wahrscheinlichkeit eine geringere Leistung als GL_D erbringen darf. Insofern der zu dimensionierende Prozess in 95% aller Fälle die benötigte Leistung GL_D erbringen soll, folgt hieraus z.B., dass:

$$\phi(z_D) \leq 0,05 ; z_D = \frac{GL_D - \mu_D}{\sigma_D} \quad (5.11)$$

μ_D Erwartungswert der Leistungsfähigkeit des zu dimensionierenden Prozesses [Einheit/h]
 σ_D Standardabweichung der Leistungsfähigkeiten des zu dimensionierenden Prozesses [Einheit/h]
 $\phi(z_D)$ kumulative Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

gelten muss. D.h. der Erwartungswert und die Standardabweichung des zu dimensionierenden Prozesses müssen so gewählt werden, dass die Wahrscheinlichkeit eine geringere Leistung als GL_D zu erbringen

²⁴⁶ Das gezeigte Verfahren wurde in Anlehnung an die aus der Logistik bekannte „Lagerdimensionierung bei normalverteilten Artikelbeständen“ aufgestellt (vgl. (Arnold & Furmans 2009)).

kleiner als z.B. 5% ist. Aufgrund der bestehenden Zusammenhänge zur Standardnormalverteilung gilt: Je kleiner σ_D bei gegebenem μ_D , desto geringer ist in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit, eine geringere Leistung als GL_D zu erbringen. Auch hier zeigt sich somit erneut, wie wichtig eine Reduktion der Standardabweichung (bzw. des Variationskoeffizienten) ist. Je größer das Verhältnis von σ_D zu μ_D desto geringer ist die sich ergebene Auslastung des zu dimensionierenden Prozesses. Diese bestimmt sich nun zu:

$$\rho_D = \frac{\mu_V}{\mu_D} \quad (5.12)$$

Und es gilt unter den obigen Bedingungen:

$$\mu_D = \mu_V + \sigma_V \times u_y + u_{0.05} \times \sigma_D \quad (5.13)$$

D.h.: Je größer σ_V und σ_D , desto größer ist μ_D und desto geringer ρ_D .

Die obigen Ausführungen verdeutlichen, welche Konsequenzen eine Dimensionierung mit der Vorgabe hat, dass ein zu dimensionierender Produktionsprozess mit hoher Wahrscheinlichkeit eine höhere Leistung als sein Vorgängerprozess erbringen soll.

Für ein Bauproduktionssystem ergeben sich hieraus drei Konsequenzen:

- 1 Die Ursachen von Prozessvarianzen sind zu identifizieren und weitestgehend zu eliminieren.
- 2 In den Fällen, in denen die Ursachen von Prozessvarianzen 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 Auslastung der Nachfolgerprozesse zu steigern und deren Dimensionierung 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 Bauproduktion minimal gestört wird (z.B. durch eine entsprechenden Ressourcenreallokation).

Die Wirksamkeit der ersten Maßnahme lässt sich leicht anhand von Abbildung 5-5 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 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. (Arnold & Furmans 2009)). Es gilt: Eine niedrige - durchschnittliche - Auslastung benötigt nur einen geringen Pufferbestand, eine hohe - durchschnittliche - Auslastung einen hohen. Puffer können, insofern 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. im Mittel gleichen sich „Leistungsspitzen“ und „-täler“ aus. Zur Überbrückung des Aufeinandertreffens eines Leistungstales eines Vorgängerprozesses und einer Leistungsspitze eines Nachfolgerprozesses ist ein entsprechend großer Puffer zu schaffen, der sich auf- und abbaut.

Da die Installation von Puffern allerdings ungewünschte Nebeneffekte hat (z.B. den Verlust von Transparenz), ist die Reduktion der Prozessvarianzen der Bildung von Puffern vorzuziehen.

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. (I. D. Tommelein et al. 1999)). Dies gilt allerdings nur, sofern die Varianzen nicht bereits durch ausreichend Pufferung zwischen den einzelnen Prozessen abgefangen werden.

Da Prozessvarianzen im Bauwesen nicht komplett eliminierbar sind (z.B. bedingt durch Witterungseinflüsse) und Puffer nicht immer ausreichend dimensioniert werden können (z.B. da der Lagerplatz beschränkt ist oder keine passenden Baumaschinenkapazitäten zur Aufrechterhaltung des Puffers zur Verfügung stehen), 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 entweder, diese Problematik durch aktives operatives Management zu beheben oder auf Zwischentätigkeiten auszuweichen.

Im Vergleich zur stationären Industrie verändern sich die Produktionsbedingungen in der Bauproduktion meist in deutlich kürzeren Zyklen. Dies resultiert insbesondere aus den auf die Bauproduktion wirkenden Einflüsse²⁴⁷ und den nicht statisch verbundenen Arbeitsstationen. Beides ist eine Konsequenz aus der Produktionsaufgabe. Eine Folge hieraus ist, dass die Produktionsprozesse sich dynamisch verhalten. Dieser Tatsache ist es wiederum geschuldet, dass der dritten Maßnahme eine hohe Rolle im Baubetrieb zugeordnet ist. Eine Grundvoraussetzung zur bewussten Entscheidungsfindung in diesem Zusammenhang ist eine ausreichende Versorgung mit den hierfür notwendigen Informationen.

²⁴⁷ vgl. Abbildung 3-5.

5.1.3 Pull-Prinzip

Das Pull-Prinzip ist dadurch gekennzeichnet, dass es sich am tatsächlichen Bedarf des Kundenprozesses orientiert (vgl. Kapitel 2.3). Zur Erläuterung der Wirkungsweise wird ein zweistufiges Analyseverfahren gewählt. Hierzu wird in Kapitel 5.1.3.1 zunächst die Auswirkung der Bestandsplanung auf die Produktion im Erdbau untersucht. Anschließend wird in Kapitel 5.1.3.2 analysiert, was für eine Rolle die Art und Weise der Abschätzung des Systemverhaltens spielt. In Kapitel 5.1.3.3 wird der Zusammenhang zwischen dem Pull-Prinzip und einer kontinuierlichen Prozessverbesserung dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 5.1.3.4 zusammengefasst.

5.1.3.1 Analyse der Bestandsplanung

Lean Management strebt grundsätzlich das Ziel des sog. "One-piece-Flows" (OPF) an. Dies bedeutet, eine Produktion zu etablieren, in der immer nur ein Gegenstand bearbeitet und direkt ohne Zwischenlagerung an den nächsten Produktionsschritt weitergegeben wird (vgl. (Liker 2009)).

Unter Lagerbeständen sind insbesondere die physischen Materialpuffer zwischen den einzelnen Produktionsprozessen zu verstehen, die einen Puffer gegenüber Bedarfsschwankungen bilden. Des Weiteren können allerdings zusätzliche Kapazitäten und längere Reaktionszeiten als Puffer fungieren (vgl. (Smalley 2005)).

Da die Idee des OPF der Automobilindustrie entstammt, ist zunächst zu untersuchen, ob die hinter der Einführung stehende Intention auch für den Erdbau zutrifft. Das wesentliche Ziel des OPF ist die Minimierung der zwischen zwei Prozessen befindlichen Materiallager. Hierbei ist zunächst festzustellen, dass das im Erdbau verwendete Material im Vergleich zur Automobilbranche deutlich kostengünstiger ist, aber in einer viel größeren Menge verarbeitet wird (d.h. der m^3 Material kostet deutlich weniger aber es werden viel mehr m^3 verbaut).

Die Problemstellung, "wie viel Material vom Lieferantenprozess in einem bestimmten Planungszeitraum zur Verfügung gestellt werden sollte", wird anhand des sog. "Economic Order Quantity" (EOQ) - Problems (vgl. (Hopp & Spearman 2011)) analysiert. Der betrachtete Produktionsprozess ist der Kundenprozess und der ihn mit Material beliefernde Produktionsprozess der Lieferantenprozess²⁴⁸.

Es stellt sich die Frage, welche Menge an Material von Lieferantenprozess produziert werden soll, um einen kostenminimalen²⁴⁹ Produktionsverlauf zu erhalten. Eine Möglichkeit, diesen Sachverhalt zu quantifizieren, bietet das sog. "News Vendor Model" (NVM) (vgl. (Hopp & Spearman 2011)). Das NVM geht in der hier vorgestellten Version von folgenden Annahmen aus:

- Einzelne Produkte (hier Material für den Erdbau (z.B. in m^3 Erdmaterial) können separiert betrachtet werden und es gibt keine Interaktionen (z.B. in Form von Ressourcen die für mehrere Produkte gleichzeitig benötigt werden)²⁵⁰
- Die Planung wird für einzelne Perioden durchgeführt und die Perioden könne getrennt betrachtet werden (d.h. das kein Material von einer Periode in die nächste übernommen wird)

²⁴⁸ Diese Empfänger- und Lieferanten-Verhältnis gilt für die gesamte Produktion.

²⁴⁹ man beachte an dieser Stelle, dass falls weitere Zielegrößen (außer Kosten) für die Produktion gelten, diese unbedingt bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. In dem hier vorgestellten Zusammenhang wird nur die Zielgröße Kosten untersucht.

²⁵⁰ Diese Annahme ist erforderlich, damit nicht weitere Randbedingungen eingeführt werden müssen. Man geht davon aus, dass jeder m^3 isoliert betrachtet werden kann (d.h. ohne Korrelation zu einem anderen m^3).

- Die Nachfrage ist zufallsverteilt²⁵¹
- Anlieferungen werden so gesteuert, dass sie pünktlich den geplanten Bedarf decken²⁵²
- Die Kostenverteilung der Überschüsse und der nicht gedeckten Bedarfe ist linearverteilt

Das NVM bildet des Weiteren nur einen einmaligen und unabhängigen Bestellvorgang ab, d.h. es wird nur eine Produktionsperiode und der damit verbundene Bedarf abgebildet. Trotz der Einschränkungen des NVM ist es gut geeignet, um qualitativ-quantitativ zu analysieren, was aus Sicht der Kosten bei der Vorhaltung von Beständen zu berücksichtigen ist.

Unter den aufgelisteten Bedingungen kann die Kostenfunktion in Abhängigkeit von der Bestellmenge²⁵³ wie folgt dargestellt werden (Hopp & Spearman 2011):

$$K(Q) = c_o \int_0^Q (Q - x)g(x)dx + c_s \int_Q^\infty (x - Q)g(x)dx \quad (5.14)$$

$K(Q)$	Durch Überschuss bzw. Mangel entstehende Kosten [€]
x	Menge der Nachfrage (eine Zufallsvariable) [Einheit/Periode]
$g(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Nachfrage [-]
c_o	Kosten je Einheit bei Überschuss [€/Einheit]
c_s	Kosten je Einheit bei Mangel [€/Einheit]
Q	Bestellmenge bei einmaliger Bestellung [Einheit/Periode]

Der Term $c_o \int_0^Q (Q - x)g(x)dx$ stellt dabei die Kosten dar, die bei Lagerung entstehen.

$c_s \int_Q^\infty (x - Q)g(x)dx$ bildet entsprechend die Kosten ab, die durch Mangel entstehen.

Übertragen auf diskrete Werte stellen die Integrale die Aufsummierung der Multiplikation der Überschüsse/Unterdeckung mit der jeweiligen relativen Häufigkeit der Nachfrage dar, d.h. den Erwartungswert der Über- bzw. Unterdeckung. Somit handelt es sich auch bei den Kosten um Erwartungswerte.

Durch Ableitung der Kostenfunktion und gleichzeitigem Nullsetzen erhält man (vgl. (Hopp & Spearman 2011)):

$$\frac{dK(Q)}{dQ} = c_o \int_0^Q 1g(x)dx + c_s \int_Q^\infty (-1)g(x)dx = c_o G(Q) - c_s [1 - G(Q)] = 0 \quad (5.15)$$

Als Lösung folgt:

$$G(Q^*) = \frac{c_s}{c_o + c_s} \quad (5.16)$$

²⁵¹ In der hier vorgestellten Variante wird des Weiteren unterstellt, dass die Nachfrage annähernd normalverteilt ist.

²⁵² Dies bedeutet, dass nur die eingeplante Fehlmenge eintritt.

²⁵³ Die Bestellmenge ist diejenige Menge, die ein betrachteter Produktionsprozess von dessen Vorgänger in einer Periode bestellt. D.h. der betrachtete Produktionsprozess hat einen Bedarf an Vorprodukten (die der Lieferantenprozess zur Verfügung stellt), damit er produzieren kann, der Bedarf hängt wiederum von der Leistungsfähigkeit des betrachteten Prozesses ab.

Q^* Optimale Produktionsmenge des Lieferantenprozesses

Wobei $G(Q^*)$ diejenige Wahrscheinlichkeit darstellt, dass die Nachfrage (die Nachfrage in eine Periode entspricht der erbrachten Leistung in einer Periode – d.h. alles was bestellt wird verbraucht) kleiner oder gleich Q^* ist. Hieraus folgt, dass Q^* so gewählt werden sollte, dass die Wahrscheinlichkeit, genug Material produziert zu haben, $\frac{c_s}{c_o+c_s}$ ist. Aus der Annahme der Normalverteilung für den Bedarf resultiert:

$$G(Q^*) = \Phi(z) = \frac{c_s}{c_o + c_s}, \text{ mit } z = \frac{Q^* - \mu}{\sigma} \quad (5.17)$$

μ Mittlere Nachfrage

σ Standardabweichung der Nachfrage

Wobei Φ die kumulative Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung ist.

Um eine grafische Darstellung des Verlaufs der Bestellmenge in Abhängigkeit von den Kosten c_o und c_s zu ermöglichen, ist es notwendig, diese Gleichung so umzuformen, dass die beiden Kostenfaktoren im Verhältnis zueinander stehen.

$$\Phi\left(\frac{Q^* - \mu}{\sigma}\right) = \frac{c_s}{c_o + c_s} \times \frac{1}{\frac{c_s}{c_o}} \quad (5.18)$$

$$\Phi\left(\frac{Q^* - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\frac{c_o}{c_s} + 1} \quad (5.19)$$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\frac{c_o}{c_s} + 1} \quad (5.20)$$

Zur Bestimmung der Werte von $\Phi(z)$ kann die Tabelle der Standardnormalverteilung herangezogen werden. Aus dieser Tabelle kann bestimmt werden, welchen Wert die kumulative Verteilungsfunktion einer Standardnormalverteilung für einen Wert z annimmt. Dies kann jedoch auch umgekehrt für eine gegebene Wahrscheinlichkeit erfolgen, d.h. $\Phi(z) \rightarrow z$.

Mit:

$$Q^* = \mu + z \times \sigma \quad (5.21)$$

$$\frac{c_o}{c_s} = c \quad (5.22)$$

$$\Phi\left(\frac{Q^* - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{c + 1} \quad (5.23)$$

lässt sich für einen gegebenen Mittelwert und eine gegebene Standardabweichung der Graph für Q^* in Abhängigkeit von c aufstellen.

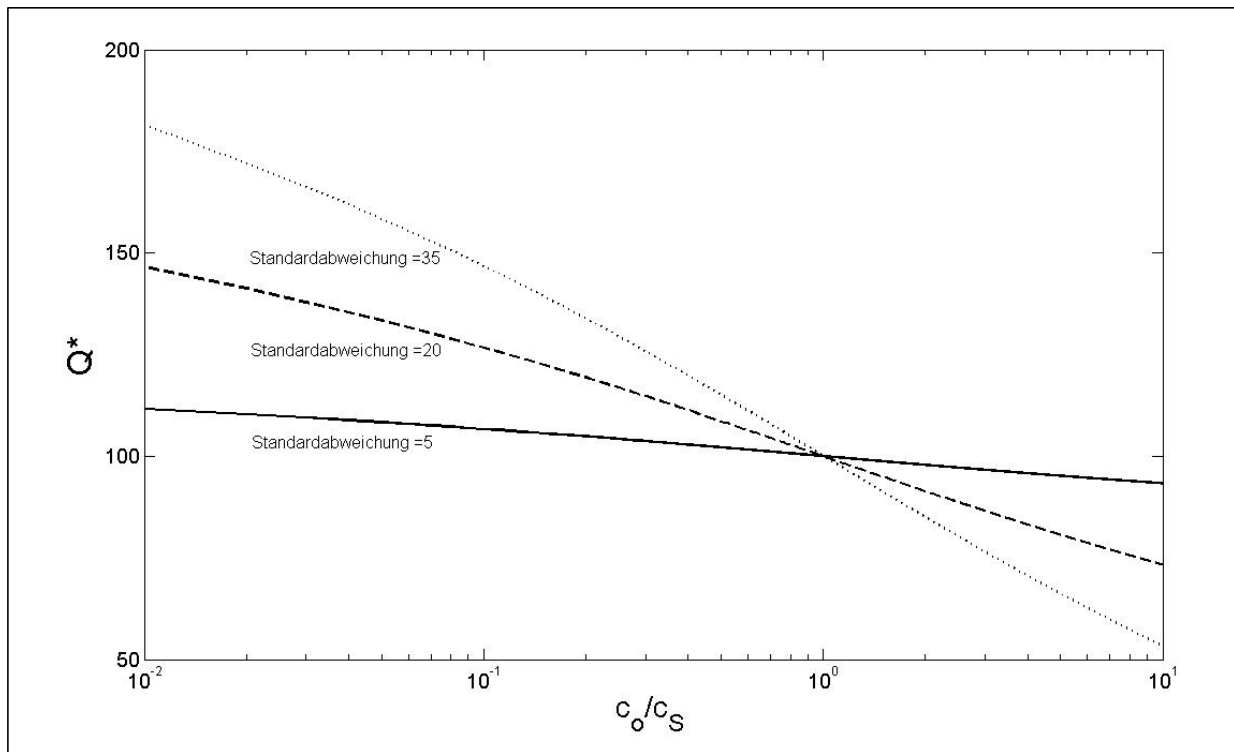


Abbildung 5-6: Optimale Produktionsmenge Q^* in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Kosten pro überschüssiger Einheit und Kosten pro mangelnder Einheit

Abbildung 5-6 bildet den Verlauf einer exemplarischen Bestellmenge dar. Es wurde ein Mittelwert von 100 Einheiten (z.B. m^3 Erdmaterial) angenommen. Es sind drei Fälle mit unterschiedlichen Standardabweichungen abgebildet. Wie erwartet sinkt mit steigenden Kosten für einen Überschuss die Bestellmenge. Für geringe Kosten für Überschüsse ist es hingegen sinnvoll, größere Materialmengen zu bestellen. Gleichzeitig hängt die Entwicklung der Bestellmenge stark von der zu erwartenden Standardabweichung des Verbrauchs ab. Aufgrund der hohen Standardabweichung im Bedarf bei Arbeitsstationen im Erdbau und der subjektiv empfundenen geringen entstehenden Kosten bei Überschüssen erscheint es zunächst sinnvoll tendenziell größere Materialmengen zu bestellen.

Zur quantitativen Analyse ist es erforderlich, c_s und c_o zu bestimmen. Es bleibt die Frage offen, mit welchen Zahlenwerten man c_s und c_o angibt. Eine Möglichkeit c_s zu quantifizieren sind die entgangenen Möglichkeiten der Produktion (die sog. Opportunitätskosten²⁵⁴). Im Erdbau kann man diesen Sachverhalt damit beschreiben, dass Baumaschinen im Fall von Mangel an Baumaterial warten müssen. Die in Geldeinheiten bewertete entgangene Produktionszeit (d.h. das, was die wartenden Baumaschinen während der Wartezeit produzieren hätten können, wenn ausreichend Material vorhanden gewesen wäre) ist somit eine Möglichkeit, die Opportunitätskosten zu quantifizieren.

Die Kosten für Materialüberschuss c_o ergeben sich traditionell aus den Lagerkosten (z.B. Miete für Fläche), der Verzinsung des gebundenen Kapitals und dem Materialverlust in Folge von Beschädigung während der Lagerzeit. Dem entgegenzusetzen sind allerdings weitere, auf den ersten Blick nicht ersichtliche Kosten, die bei Materialüberschuss entstehen. Diese sind für den Fall Erdbau insbesondere:

- Kosten zur Erstellung der Zwischenlagerung (z.B. insbesondere bei witterungsempfindlichem Material ist dieses auch in den Zwischenlagern so einzubauen, dass es witterungsunempfindlicher wird z.B. durch Verdichtung)

²⁵⁴ Vgl. Kapitel 3.

- Kosten durch erneutes Aufnehmen und Transportieren von gelagertem Material²⁵⁵

Somit kann c_o wie folgt bestimmt werden:

$$c_o = K_{MAT} \times VZ + K_{Lag.} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{Q_i} \quad (5.24)$$

c_o	Kosten, die bei Materialüberschuss pro m^3 entstehen [€/m ³]
K_{MAT}	Materialkosten pro m^3 [€/m ³]
VZ	Angenommener Zinssatz pro Periode [%]
$K_{Lag.}$	Kosten, die durch die Lagerung entstehen [€/m ³] ²⁵⁶
K_i	Kosten für Baumaschine i inkl. Fahrer pro Stunde [€/h] ²⁵⁷
Q_i	Leistungsfähigkeit der Baumaschine i [m ³ /h]

Die Kosten K_i entstehen beim Dozer und der Walze für das Erstellen des Zwischenlagers, beim Bagger für das Laden & Lösen des Materials im Zwischenlager und bei den Transportfahrzeugen für die zusätzlich zu überwindenden Transportdistanzen. i sind diejenigen Baumaschinen, die an der Erstellung, Unterhaltung und Leerung des Materiallagers beteiligt sind. Des Weiteren fallen hierunter auch insbesondere Mehrkosten die dadurch entstehen, dass Baumaschinen nicht optimal angedient werden (vgl. Kapitel 5.1.1 Beispiel des Zusammenspiels zwischen Planieraupe und Transportfahrzeugen).

$K_{Lag.}$ ist die Summe der mit der Lagerung zusammenhängenden Kosten. Hierunter fallen sowohl einmalige Kosten - innerhalb einer Periode - die durch Lagererstellung (z.B. Planung, Kommunikation etc.) und Lagerleerung (z.B. Antransport notwendiger zusätzlicher Baumaschinen) entstehen, als auch zusätzliche entstehende Kosten, die während der Lagerung entstehen (z.B. die Anmietung von Lagerungsflächen).

Bei den Transportdistanzen ist unter Umständen darauf zu achten, nur diejenigen Mehrkosten anzurechnen, die über die Distanz von Materialquelle zum letztlich Einbauort hinausgehen²⁵⁸.

Sind die Lagerplätze nahe der Einbaustelle, kann evtl. auf einen Transport mit Transportfahrzeugen (d.h. LKW, SKW usw.) verzichtet werden und das Material mit dem Dozer direkt geschoben werden, in diesen Fällen entfallen die zusätzlichen Transportkosten und die entstehenden Mehrkosten sind durch eine verringerte Leistung des Dozers zu berücksichtigen.

Die Kosten c_s können für unkritische Aktivitäten²⁵⁹ wie folgt bestimmt werden²⁶⁰:

²⁵⁵ In den seltensten Fällen ist das Material direkt am Ort der Nachfrage, bereits kleinere Distanzen können einen erheblichen Mehraufwand bedeuten (dies konnte vom Autor anhand durchgeführter Baustellenbeobachtungen validiert werden).

²⁵⁶ Hierunter fallen nur Kosten, die während der Zeit der Lagerung entstehen, nicht Kosten, die während der Einlagerung (d.h. insbesondere Bewegung des zu lagernden Materials) entstehen. Des Weiteren sind hierunter durch das Lager entstehende Fixkosten einzuordnen.

²⁵⁷ Zur Ermittlung dieser Kosten wird auf die klassischen Kalkulationsmethoden verwiesen, z.B. (Drees 2011).

²⁵⁸ Beispielsweise wäre es auch möglich, dass ein Zwischenlager auf halber Strecke zwischen Materialquelle und Einbauort eingerichtet wird. In diesen Fällen wäre es nicht korrekt zu behaupten, dass die Mehrkosten durch das Zwischenlager anteilig aus den kompletten Transportkosten von Zwischenlager zum letztlichem Einbauort bestehen. Real entstehen nur Mehrkosten durch den zusätzlichen Belade- und Abladevorgang.

²⁵⁹ d.h. diese liegen nicht auf dem sog. kritischen Pfad (vgl. (Gehbauer 2004)).

²⁶⁰ Es handelt sich hierbei um eine konservative Abschätzung, da nur mit den „tatsächlich“ entstehende Kosten gerechnet wird und z.B. kein entgangener Gewinn berechnet wird.

$$c_s = \sum_{j=1}^m \frac{K_j}{Q_j} \quad (5.25)$$

c_s	<i>Kosten die Materialmangel pro m^3 entstehen</i> [€/m ³]
K_j	<i>Kosten für Baumaschine j inkl. Fahrer pro Stunde</i> [€/h] ²⁶¹
Q_j	<i>Leistungsfähigkeit der Baumaschine i</i> [m ³ /h]

Die Kosten c_s können für kritische Aktivitäten²⁶² wie folgt bestimmt werden:

$$c_s = \frac{K_{Verzug}}{MM} + \sum_{j=1}^m \frac{K_j}{Q_j} \quad (5.26)$$

K_{Verzug}	<i>Entstehende Kosten durch Verzug</i> [€]
MM	<i>Menge des Materialmangels in einer Periode</i> [m ³]

K_{Verzug} sind diejenigen Kosten, die durch einen Verzug - um genau eine Periode - entstehen (z.B. Vertragsstrafen und zusätzliche Baustellengemeinkosten).

Durch Beschleunigungsmaßnahmen kann eine Verlängerung der Bauzeit evtl. verhindert werden. Sollten Beschleunigungsmaßnahmen durchgeführt werden, dann sind die durch sie entstehenden Mehrkosten anstelle der durch Terminüberzug entstehenden Kosten anzusetzen, d.h:

$$c_s = \frac{K_{Beschl.}}{MM} + \sum_{j=1}^m \frac{K_i}{Q_i} \quad (5.27)$$

$K_{Beschl.}$	<i>Kosten die durch Beschleunigungsmaßnahmen²⁶³ entstehen</i> [€]
---------------	--

Fallen sowohl Beschleunigungskosten als auch Kosten aus Verzugsstrafen an, sind beide entsprechend zu berücksichtigen.

Die Leistung des Einbaus (d.h. im Wesentlichen Dozer und Walze) ist bei der Erstellung von Zwischenlagern deutlich größer als bei Erstellung eines Bauwerks²⁶⁴. Die Leistung der LKW kann für beide Fälle (d.h. für die Bestimmung der Transportleistung vom Zwischenlager zum Einbauort und der Leistung zur Berechnung der Opportunitätskosten) als identisch angenommen werden. Für die Leistung der Bagger kann ebenfalls angenommen werden, dass diese annähernd identisch bei Laden & Lösen des Materials im gewachsenen Zustand und im Zwischenlager ist²⁶⁵.

Hieraus folgt bei der Betrachtung eines kritischen Prozesses:

²⁶¹ Zur Ermittlung dieser Kosten wird auf die klassischen Kalkulationsmethoden verwiesen, z.B. (Drees 2011).

²⁶² d.h. diese liegen auf dem sog. kritischen Pfad.

²⁶³ z.B. Überstunden oder Einsatz zusätzlicher Baumaschinen.

²⁶⁴ Dies resultiert daraus, dass bei Erstellung der Lager meist nicht so exakt gearbeitet werden muss.

²⁶⁵ Dies gilt selbstverständlich nur, wenn die Materialeigenschaften nicht zu stark voneinander abweichen. Ein Beispiel für welches diese Annahme nicht gilt wäre gewachsener Fels, dieser ist nach Laden & Lösen des Materials im gewachsenen Zustand deutlich einfacher im Zwischenlager zu laden und zu lösen.

$$c = \frac{c_o}{c_s} = \frac{K_{MAT} \times VZ + K_{Lag.} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{Q_i}}{\frac{K_{Verzug}}{MM} + \frac{K_{Beschl.}}{MM} + \sum_{j=1}^m \frac{K_j}{Q_j}} \quad (5.28)$$

Bei Betrachtung der beiden Funktionen für c wird deutlich, dass die Wahl der optimalen Produktionsmenge des Lieferantenprozesses von den jeweiligen individuellen Projektbedingungen abhängt (insbesondere z.B. Art der Lagerhaltung innerhalb der Produktion²⁶⁶, Verzinsung, Verzugsstrafen und Vorhaltungskosten für Lagerflächen). Ein beliebter Fehler bei dieser Betrachtung ist die Nichtbeachtung der anfallenden Kosten durch die Erstellung der Zwischenlagerung und der Kosten durch erneutes Aufnehmen und Transportieren von gelagertem Material. Insbesondere bei Material, das aufbereitet wird, entstehen Kosten, die erst bei Einbau und einer entsprechenden Abnahme inklusive Zahlung in Liquidität umgewandelt werden. Die Dauer der Lagerung entspricht somit einer entgangenen Kapitalverzinsung aller Mittel, die in den Beständen gebunden sind (Lohnkosten, Gerätekosten, Aufbereitungskosten usw.)²⁶⁷. Werden diese berücksichtigt, erscheint die Wahl einer großen Bestellmenge aus Kostensicht nicht automatisch vorteilhaft.

Geht man nun beispielsweise davon aus, dass die Kosten von Überproduktion denjenigen Kosten von mangelnder Produktion entsprechen (d.h. $\frac{c_o}{c_s} = 1$), dann sollte genau der Mittelwert des Verbrauchs bestellt werden (vgl. Abbildung 5-6)²⁶⁸.

Es folgt:

- Je größer die Schwankung im Kundenprozess, desto größer ist die Bestellmenge unter der Annahme $\frac{c_o}{c_s} < 1$.
- Umgekehrtes gilt für $\frac{c_o}{c_s} > 1$: In diesem Fall ist die kostenmäßig günstigste Bestellmenge kleiner bei stärkerer Schwankung. Ein solches Bestellverhalten hätte allerdings auch zur Folge, dass der Erwartungswert der gesamten Produktion deutlich abnimmt, d.h. die Produktion benötigt im Durchschnitt länger, da die Maschinen mehr Wartezeiten haben.

Es wird somit erneut deutlich, welchen Einfluss Varianzen haben.

Außerdem kann man den Einfluss des Betrachtungshorizonts bzw. der unterstellten Periodendauer erkennen. Werden für dieses Modell kleinere Betrachtungszeiträume verwendet, so sinkt der Mittelwert des Verbrauchs und die Standardabweichung ebenfalls (vgl. Kapitel 5.1.3.2). Dies hat zur Folge, dass bei mehreren Bestellvorgängen mit kleiner Bestellmenge insgesamt kleinere Puffer ausreichen, als bei wenigen Bestellvorgängen mit größeren Bestellmengen.

Nicht enthalten sind die realisierbaren Vorteile in der gesamten Lieferkette bzw. Supply Chain. Kleinere Bestellmengen für kleinere Zeitperioden verringern starke Schwankungen in der gesamten Lieferkette (vgl. (I. D. Tommelein et al. 1999)). Da ein Kunde meistens²⁶⁹ die Kosten der Lieferanten indirekt über

²⁶⁶ Hierunter wird verstanden, dass die Lagerhaltung von der jeweiligen betrachteten Tätigkeit abhängt.

²⁶⁷ Oder insofern Fremdkapital eingesetzt wird, einer zusätzlichen Belastung durch die anfallenden Zinsen.

²⁶⁸ Genauer: Es soll pro Periode vom Lieferantenprozess genau die Menge produziert werden, die im Mittel in dieser Periode vom Kundenprozess benötigt wird.

²⁶⁹ Eigentlich immer, abgesehen von kurzfristigen Veränderungen der Marktsituation, die dazu führen, dass der Lieferant unter Kostendeckung verkauft. Erfolgt dies allerdings langfristig, ist eine Insolvenz des Lieferanten nicht vermeidbar.

die Produkte mitträgt, kann diese Einsparung erhebliche Potentiale haben (insbesondere bei längerfristiger Zusammenarbeit).

Ein weiteres Ziel vom OPF ist den Planungszeitraum zu minimieren. Im Folgenden wird dargestellt, welche Vorteile kleine Planungshorizonte besitzen (bzw. welche Nachteile große Planungshorizonte haben).

5.1.3.2 Prognosen bei der Produktionsplanung im schweren Erdbau

Im vorherigen Kapitel 5.1.3.1 wurde auf den Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Bestände und der Länge des Planungshorizontes aufmerksam gemacht. Es wurde bereits angedeutet, dass es für die Planung der Bauproduktion von erheblicher Bedeutung ist, wie weit ein zu planender Zeitraum in der Zukunft liegt. Der Einfluss dieser Größe wird im Folgenden genauer analysiert.

Der durchschnittliche Leistungsbedarf und die Varianz des Leistungsbedarfs unterliegen im Betrieb einer gewissen Unsicherheit. Dies bedeutet, dass nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gesagt werden kann, mit welchem durchschnittlichen Leistungsbedarf zu rechnen ist und welche Schwankung dieser haben kann²⁷⁰.

Unter den Annahmen, dass man aus dem Leistungsbedarf der ersten Periode eine bessere Abschätzung für den durchschnittlichen Leistungsbedarf und die Varianz des Leistungsbedarfs der zweiten Periode abgeben²⁷¹ kann, und dass je kleiner eine Periode ist, desto besser die Abschätzung des Leistungsbedarfs ausfällt - da sich die Produktionsbedingungen in diesem kurzem Zeitraum kaum verändern -, folgt, dass man den Erwartungswert und die Varianz des Leistungsbedarfs bei kleinen Planungshorizonten mit größerer Sicherheit abschätzen kann.

Der sogenannte Vertrauensbereich, der die Wahrscheinlichkeit eines Irrtums repräsentiert (d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass der durch Abschätzung festgelegte durchschnittliche Leistungsbedarf oder die entsprechend geschätzte Varianz des Leistungsbedarfs nicht innerhalb des Vertrauensbereichs liegt) kann für den durchschnittlichen Leistungsbedarf und die Varianz des Leistungsbedarfs um so enger gewählt werden, je kleiner die zugehörige Streuung des Wertes ist. Grafisch kann man sich dies qualitativ wie in Abbildung 5-7 dargestellt vorstellen.

Der wahre - aber unbekannte - Mittelwert $\mu(t)$ steigt zunächst mit größer werdendem Prognosehorizont an. In Abbildung 5-7 wurde unterstellt, dass der wahre Mittelwert proportional zur Länge des Planungshorizonts ist. Der wahre Mittelwert $\mu(t)$ wird mit einer gewissen Streuung $f_{\mu}(t)$ abgeschätzt. Die Streuung hängt wiederum von der Länge des Prognosehorizonts t ab. Je nachdem, welche obere und untere Vertrauensgrenze gewählt wird (d.h. welche Wahrscheinlichkeit des Irrtums α akzeptiert wird), handelt es sich um eine größere oder kleinere akzeptierte Streuung. Die Steigung der Vertrauensgrenze hängt von der Anzahl der Einflussparameter auf den Materialverbrauch und deren Grad des Einflusses ab. Neben der Anzahl und des Grads des Einflusses spielt insbesondere die Volatilität der Einflüsse eine wesentliche Rolle (siehe hierzu weiter unten).

²⁷⁰ d.h. man unterliegt einer Unsicherheit bei der Schätzung des Mittelwerts, der Varianz und der Dichtefunktion.

²⁷¹ Eine weitere Annahme ist hierbei, dass die Produktionsbedingungen vergleichbar bleiben.

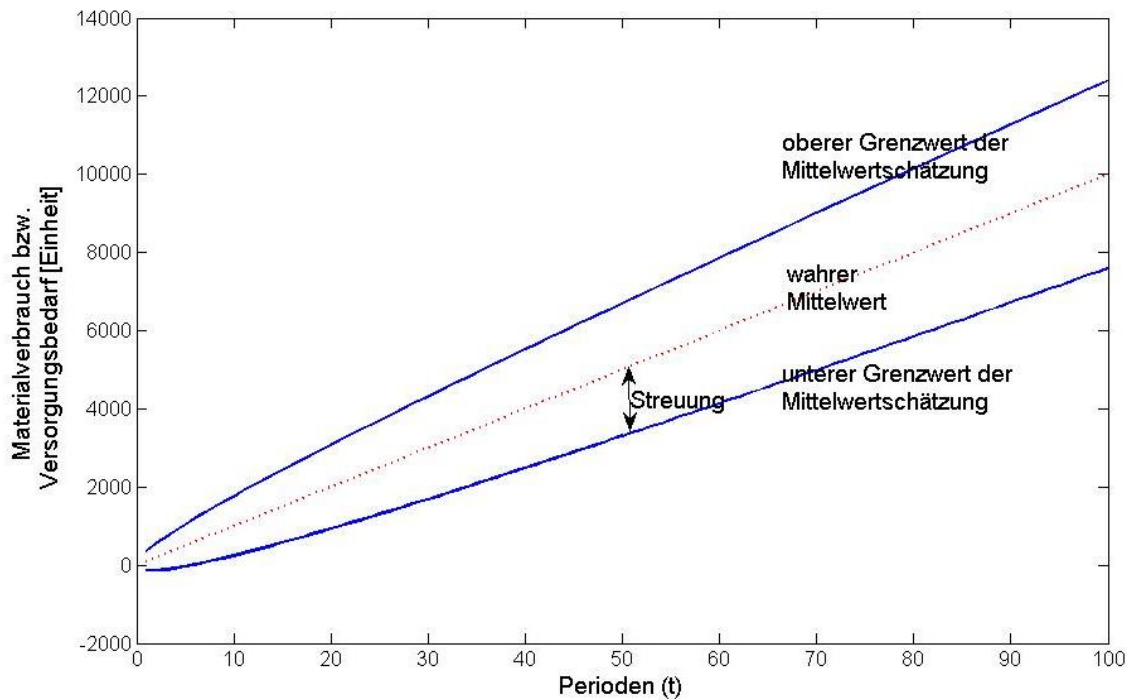


Abbildung 5-7: Entwicklung des Vertrauensintervalls für den Mittelwert in Abhängigkeit des Planungshorizonts²⁷²

In einem gleichbleibenden System sind die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt eines bestimmten Zustandes immer identisch (unterstellt wird des Weiteren Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Zeitintervallen). Für eine Planungsperiode gilt:

$$c_{\mu_{Schätz}}(\Delta t) = \frac{\sqrt{E(Var(\mu_{Schätz}\Delta t))}}{E(\mu_{Schätz}(\Delta t))} = \frac{\sqrt{\sigma_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)}}{\mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)} \quad (5.29)$$

$c_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)$	Variationskoeffizient der Schätzung des Mittelwerts für (Δt) [-]
$\sqrt{E(Var(\mu_{Schätz}\Delta t))}$	Standardabweichung der Mittelwertschätzung für (Δt) [Einheit]
$E(\mu_{Schätz}(\Delta t))$	Erwartungswert der Mittelwertschätzung für (Δt) , entspricht $\mu(\Delta t)$ [Einheit]

Bei $E(\mu_{Schätz}(\Delta t))$ handelt es sich im Übrigen um den wahren Erwartungswert der Mittelwertabschätzung und bei $\sqrt{E(Var_{\mu_{Schätz}}(\Delta t))}$ um die wahre Standardabweichung.

Aufgrund der in den Formeln 5.1 und 5.2 dargestellten Zusammenhänge für unabhängige Zufallszahlen folgt für n Planungsperioden:

²⁷² Exemplarischer Verlauf der Mittelwertschätzung mit einem wahren Mittelwert von 100 und einer wahren Varianz der Schätzung von 80 (die Einheit könnte z.B. m³ oder m² sein). Ein ähnliches qualitatives Diagramm könnte man auch für die Schätzung der Varianz des Verbrauchs erstellen.

²⁷³ Der wahre Mittelwert entspricht dem Mittelwert der Mittelwertschätzung. D.h. bei Schätzungen des Mittelwerts wird im Mittel der wahre Mittelwert geschätzt (wäre dies nicht der Fall, so würde der Mittelwert über- oder unterschätzt werden). Identisches gilt für die Standardabweichung.

$$\mu_{\mu_{Schätz}}(n \times \Delta t) = n \times \mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t) \quad (5.30)$$

$$\sigma_{\mu_{Schätz}}(n \times \Delta t) = n \times \sigma_{\mu_{Schätz}}(\Delta t) \quad (5.31)$$

Hieraus folgt:

$$\begin{aligned} c_{\mu_{Schätz}}(n \times \Delta t) &= \frac{\sqrt{n \times \sigma_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)}}{n \times \mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)} = \frac{\sqrt{\sigma_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)}}{\sqrt{n} \times \mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)} \\ &= \frac{c_{\mu_{Schätz}}(\Delta t) \times \mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)}{\sqrt{n} \times \mu_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)} = \frac{c_{\mu_{Schätz}}(\Delta t)}{\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Hieraus folgt, dass der Variationskoeffizient mit steigendem Planungshorizont abnimmt. Des Weiteren gilt jedoch auch, dass die Standardabweichung aufgrund des in Formel 5.31 dargestellten Zusammenhangs mit wachsendem Planungshorizont wächst.

Möchte man den Leistungsbedarf Q^* mit einer hohen Sicherheit abschätzen, so ist daran zu denken, die beiden geschätzten Werte μ und σ ebenfalls mit einer hohen Sicherheit abzuschätzen. Soll z.B. der Mittelwert mit einer geringen Irrtumswahrscheinlichkeit bestimmt werden, muss man zur Sicherheit den an der oberen Vertrauensgrenze liegenden Wert entsprechend der annehmbaren Irrtumswahrscheinlichkeit α annehmen (z.B. bei Wahl von $\alpha=0,05$ wird akzeptiert, dass der geschätzte Bereich für den Mittelwert zu 2,5 % größer oder kleiner sein kann - dies entspricht einer gesamten Irrtumswahrscheinlichkeit bezüglich des Vertrauensbereichs von 5%). Wählt man nun z.B. $\alpha=0,05$ und wählt den Wert für $\mu_{Schätz}$ an der oberen Vertrauensgrenze, so ist die Wahrscheinlichkeit einen zu niedrigen Mittelwert geschätzt zu haben 2,5 %. Aus Abbildung 5-7 folgt, dass zur Sicherheit ein höherer Wert für μ und σ angenommen werden muss und, dass dieser mit steigendem Planungshorizont zunimmt.

Anhand von Abbildung 5-7 lässt sich zunächst feststellen, dass es fast egal erscheint, mit welchem Planungshorizont man plant, da der Leistungsbedarf annähernd linear mit zunehmenden Planungsperioden zunimmt. Eine überproportionale Steigerung liegt nur für einen kurzen Planungshorizont vor (vgl. erneut Abbildung 5-7). Dieses Ergebnis ist der Tatsache geschuldet, dass Unabhängigkeit unterstellt wurde. In der Realität ist jedoch der Leistungsbedarf einer Periode von dem Leistungsbedarf - und insbesondere dem verbleibenden Bestand - der vorherigen Periode abhängig. Dieser Sachverhalt wird folgend behandelt.

Hierzu wird ein Materiallager zwischen zwei Arbeitsstationen betrachtet (z.B. das Materiallager zwischen den Arbeitsstationen „LKW“ und „Planierdrape“). Vereinfacht kann der Lagerverlauf einer Periode wie in Abbildung 5-8 dargestellt angenommen werden. Dargestellt ist der Fall eines langen Planungshorizonts 1 und eines kürzeren 2. Es wird angenommen, dass eine identische Nachfrageentwicklung in beiden Fällen vorliegt und am Ende eine identische Restmenge an Material existiert. Des Weiteren erfolgt bei dem kleineren Planungshorizont keine Anpassung der Bestellmenge in Abhängigkeit von der Restmenge einer Periode.

Aus Abbildung 5-8 folgt für den durchschnittlichen Materialbestand $\emptyset_{Lagerbestand}$:

$$\emptyset_{Lagerbestand_1} = \frac{Q(2t)^* - \Delta Q(2t)}{2} + \Delta Q(2t) \quad (5.33)$$

und

$$\emptyset_{\text{Lagerbestand}_2} = \frac{Q(t)^* \times t + \Delta Q(2t) \times t}{2 \times t} = \frac{Q(t)^* + \Delta Q(2t)}{2} \quad (5.34)$$

$Q(t)^*$ Leistung der Vorgängerprozesses pro Planungsperiode t^{274} [Einheit]
 $\Delta Q(t)$ Restmenge nach Planungsperiode t [Einheit]

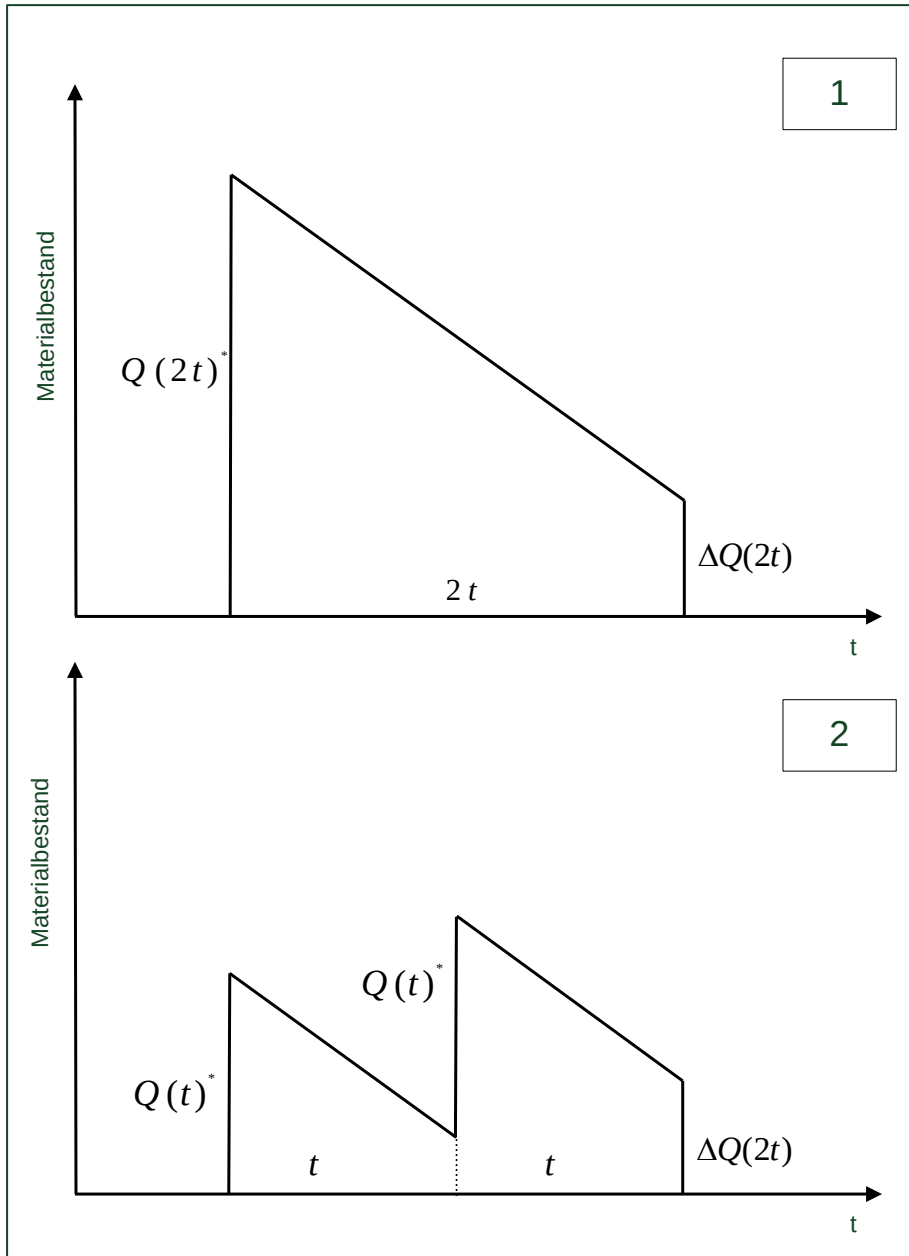


Abbildung 5-8: Materialbestandentwicklung in Abhängigkeit des Planungshorizonts

²⁷⁴ Angenommen wird, dass der Vorgängerprozess den Nachfolgerprozess chargenweise beliefert.

Mit

$$2 \times Q(t)^* = Q(2t)^* \text{ und } 2 \times \Delta Q(t) = \Delta Q(2t) \quad (5.35)$$

folgt:

$$\emptyset_{Lagerbestand_2} < \emptyset_{Lagerbestand_1} \quad (5.36)$$

$$\frac{Q(t)^* + 2 \times \Delta Q(t)}{2} < \frac{2 \times Q(t)^* - 2 \times \Delta Q(t)}{2} + 2 \times \Delta Q(t) \quad (5.37)$$

$$\frac{Q(t)^*}{2} + \Delta Q(t) < Q(t)^* - \Delta Q(t) + 2 \times \Delta Q(t) \quad (5.38)$$

$$\frac{Q(t)^*}{2} < Q(t)^* \quad (5.39)$$

Hieraus folgt, dass der durchschnittliche Lagerbestand doppelt so hoch ist, wenn mit doppelt so langem Planungshorizont geplant wird.

Für den Verlauf des Lagerbestands gilt:

$$Lagerbestand_1 (0 \leq t \leq 2t) \in [2\Delta Q(t), 2Q(t)^*] \quad (5.40)$$

$$Lagerbestand_2 (0 \leq t \leq 2t) \in [\Delta Q(t), Q(t)^* + \Delta Q(t)] \quad (5.41)$$

Es gilt weiterhin:

$$\Delta Q(t) = Q(t)^* - Q(t) \quad (5.42)$$

$Q(t)$ Materialverbrauch in Periode t [Einheit]

Hieraus folgt für die max. Streubreite des Lagerbestands:

$$\begin{aligned} \max. Streubreite_1 (0 \leq t \leq 2t) &= 2Q(t)^* - 2\Delta Q(t) \\ &= 2Q(t)^* - 2(Q(t)^* - Q(t)) = 2Q(t) \end{aligned} \quad (5.43)$$

$$\max. Streubreite_2 (0 \leq t \leq 2t) = Q(t)^* + \Delta Q(t) - \Delta Q(t) = Q(t) + \Delta Q(t) \quad (5.44)$$

In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass der Materialrestbestand einer Periode geringer ist als der Verbrauch der Periode, d.h.:

$$\Delta Q(t) < Q(t) \quad (5.45)$$

Hieraus folgt:

$$\max.Streubreite_2 < \max.Streubreite_1 \quad (5.46)$$

Unberücksichtigt ist hierbei allerdings der Vorteil, der durch eine frühere Gegensteuerung erfolgt. Bei einer Gegensteuerung wäre die Varianz der im System befindlichen Materialbestände geringer als ohne Gegensteuerung. Findet eine Gegensteuerung statt, handelt es sich um stochastisch abhängige Prozesse.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass $\Delta Q(t)$ und $Q(t)$ nicht schwanken, in der Realität handelt es sich jedoch um stochastisch verteilte Werte. Für die folgende Beweisführung wird unterstellt, dass es sich um stochastisch verteilte Werte handelt.

Man kann feststellen, dass die Varianz der Materialmengen am Ende einer Periode²⁷⁵ geringer sind, wenn eine Gegensteuerung stattfindet (z.B. liegt viel Restmaterial aus der vorherigen Periode vor, muss weniger neues Material nachbestellt werden für die nächste Periode). Mathematisch kann dies wie folgt abgebildet werden:

$$Var(MB(t)) = Var(QB(t)) + Var(\Delta Q(t)) + 2 \times Cov(QB(t), \Delta Q(t)) \quad (5.47)$$

$MB(t)$	<i>Materialbestände am jeweiligen Ende einer Periode [Einheit]</i>
$QB(t)$	<i>An den Vorgängerprozess kommunizierter Leistungsbedarf am Ende einer Periode [Einheit]</i>
$Var(MB(t))$	<i>Varianz der Materialbestände am jeweiligen Ende einer Periode [Einheit]</i>
$Var(QB(t))$	<i>Varianz des an den Vorgängerprozess kommunizierten Leistungsbedarfs am Ende einer Periode [Einheit]</i>
$Var(\Delta Q(t))$	<i>Varianz der Materialrestbestände am Ende einer Periode [Einheit]</i>
$Cov(QB(t), \Delta Q(t))$	<i>Kovarianz von an den Vorgängerprozess kommunizierten Leistungsbedarf und Materialrestbestand am Ende einer Periode [Einheit]</i>

Da hohe Werte von $\Delta Q(t)$ mit kleinen Werten $QB(t)$ einhergehen und niedrige Werte von $\Delta Q(t)$ mit hohen Werten $QB(t)$ einhergehen, handelt es sich offensichtlich um eine negative Kovarianz (dies folgt aus den mathematischen Zusammenhängen der Kovarianz). D.h. die Varianz des Bestandes am Periodenende wird durch die Gegensteuerung geringer - da der letzte Term von Formel 5.47 negativ wird.

Bei größeren Planungshorizonten steigt die Varianz der Werte von $\Delta Q(t)$ und $QB(t)$. Hieraus folgt ebenfalls, dass die Varianz von $MB(t)$ steigt. Mit steigender Varianz von $MB(t)$ steigt auch die maximale Streubreite des Bestands.

Unter der Annahme, dass eine Steuerung am Ende eines Planungshorizonts stattfindet, folgt:

- **Je kürzer ein Planungshorizont ist, desto geringer sind die durchschnittlichen Materialbestände und desto geringer ist die Varianz der Materialbestände. Da die Verläufe der Materialbestände in einem Produktionsnetzwerk repräsentativ für die Leistungsnachfrage sind (an den jeweiligen Bestellpunkten wird Leistung von einem Vorgängerprozess abverlangt), ist die Schwankung der Materialbestände gleichzusetzen mit einer schwankenden Leistungsnachfrage.**

²⁷⁵ Da zur Vereinfachung von direkter Belieferung ausgegangen wird fällt das Periodenende mit dem Belieferungszeitpunkt zusammen.

Die bisherige Annahme, dass die Vorhersagegenauigkeit für den Eintritt eines bestimmten Zustandes immer identisch ist, wird im Folgenden genauer analysiert (d.h. der annähernd lineare Verlauf in Abbildung 5-7 wird hinterfragt). Folgt man der Argumentationskette, dass die Vorhersagegenauigkeiten für die prognostizierten Werte (Varianz und Mittelwert) immer gleichgut sind, unterstellt man allerdings auch, dass zu jedem Zeitpunkt gleich viele Informationen bezüglich einer zukünftigen Entwicklung existiert. Diese Annahme entspricht nicht der baubetrieblichen Praxis (vgl. (Chong et al. 2011)). Der Informationsgehalt steigt mit näher rückendem Ausführungsdatum an. Die wesentlichen Ursachen hierfür sind:

- Die Planungsgenauigkeit steigt (z.B. wird das Vorgehen bei der Ausführung immer detaillierter)
- Die Kenntnis über äußere Einflüsse wie z.B. Witterungsbedingungen steigen
- Schätzungen für Leistungskennwerte und Materialverbräuche sind genauer, wenn auf Basis historischer Daten - die unter ähnlichen Randbedingungen entstanden sind - Prognosen für eine in der nahen Zukunft liegende Periode erstellt werden

Somit gilt, dass die Streuung der Schätzungen für Mittelwert und Varianz mit steigendem Planungshorizont stärker zunimmt²⁷⁶, als in Formel 5.29 bzw. Abbildung 5-7 dargestellt. Dies resultiert daher, dass der Informationsgehalt für Schätzungen eines näher in der Zukunft liegenden Sachverhalts tendenziell größer ist, als derjenige für einen, der weiter in der Zukunft liegt.

Der Informationsgehalt ist ab einem gewissen Zeitpunkt nahe Null und die Kovarianz nähert sich einem Endwert asymptotisch an (d.h. ab einem gewissen Prognosehorizont ist davon auszugehen, dass die verfügbaren Informationen zu keiner weiteren Verbesserung des Schätzwerts führen). Gleichzeitig wird unterstellt, dass man immer ein Minimum an Informationen besitzt (d.h. die Vertrauensbereiche werden innerhalb eines diskreten Zeitraums nicht unendlich groß²⁷⁷). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-9 qualitativ dargestellt. Der Zeitpunkt in dem eine Schätzung für den Mittelwert abgegeben wird entspricht dem Ursprung.

²⁷⁶ vgl. (Ballard et al. 2009) und (Hopp & Spearman 2011).

²⁷⁷ Dies wäre der Fall, wenn man nichts über einen Sachverhalt weiß und diesen auch nicht einschätzen kann.

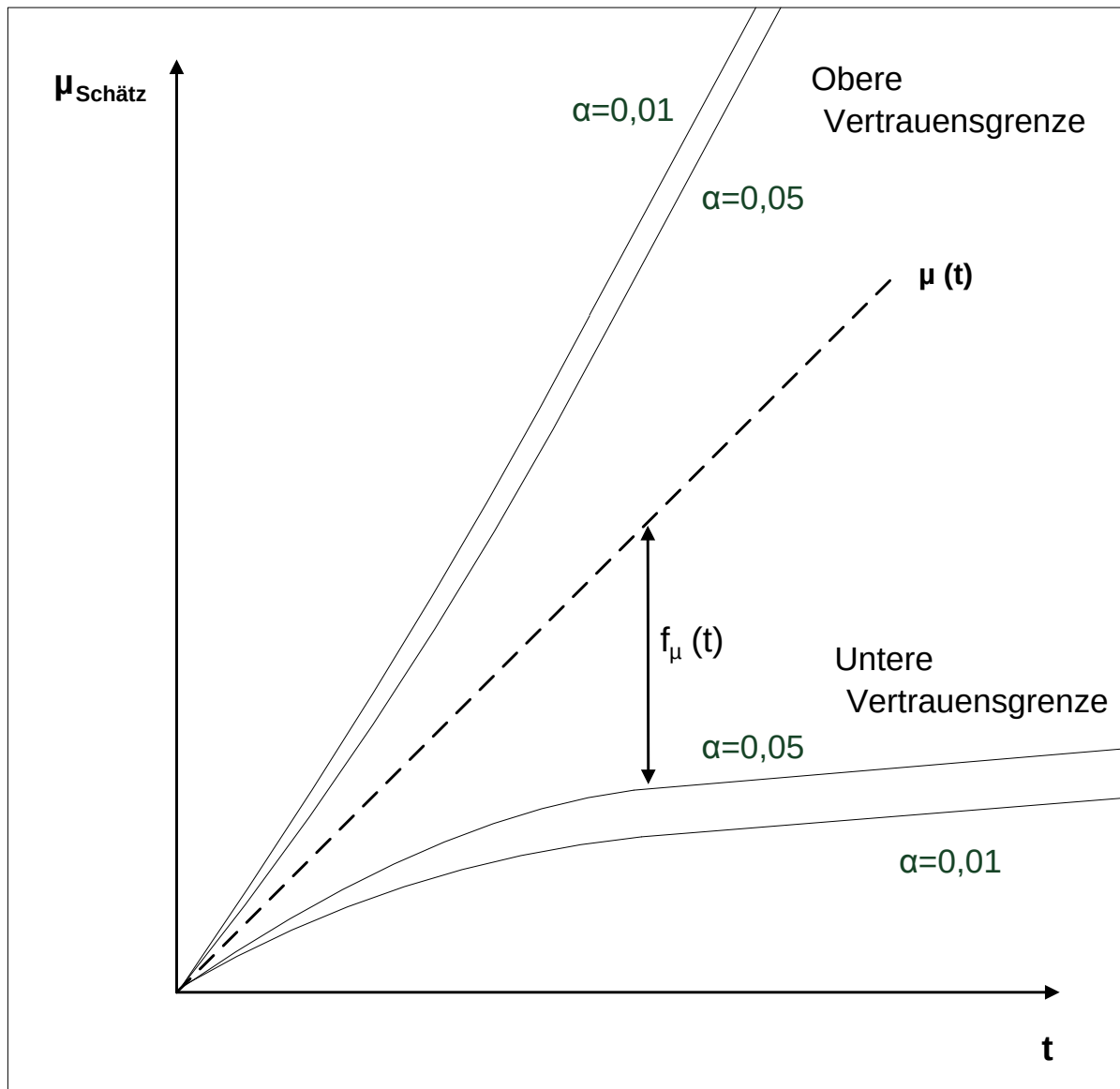


Abbildung 5-9: Entwicklung des Vertrauensintervalls für den Mittelwert in Abhängigkeit des Planungshorizonts und in Abhängigkeit des sinkenden Informationsgehalts

Die Entwicklung der Größe der Streuung $f_{\mu}(t)$ hängt von der Menge und Qualität der für die Schätzung existierenden Informationen ab. Je weniger Informationen und je schlechter die Qualität, desto größer ist die Streuung $f_{\mu}(t)$.

- Anhand der hier dargestellten Zusammenhänge ist relativ leicht nachvollziehbar, dass die Qualität der Planung umso besser ist, je mehr Informationen zur Verfügung stehen²⁷⁸ und je geringer der Planungshorizont ist²⁷⁹.

²⁷⁸ Smith et al. schreiben hierzu: "As with any planning and estimating exercise, the more information available, the more accurate and realistic will be the forecast." (S. D. Smith et al. 2000)

²⁷⁹ Chou kommt zu einem ähnlichen Ergebnis im Zusammenhang mit Kostenprognosen, die wiederum stark an Leistungs- und Terminprognosen gekoppelt sind: „Estimating accuracy is closely related to the extent of information available at the time when the estimate is developed. The conceptual estimate is often misleading because of the paucity of available information.“ (Chou 2009)

Das Bauwesen ist gekennzeichnet durch Projektarbeit und Einzelfertigung, dennoch sind die in den einzelnen Projekten (mit ähnlichem Aufgabeninhalt) stattfindenden Produktionsprozesse grundsätzlich vergleichbar. Hieraus folgt, dass aus den Erfahrungswerten der Vergangenheit Schätzwerte für die Zukunft extrapoliert werden können (d.h. sofern Informationen existieren), allerdings müssen diese auf den jeweiligen Sonderfall angepasst werden. Der Informationsgrad steigt bei einem Bauvorhaben mit näher rückendem Ausführungszeitpunkt und mit steigendem Informationsgrad steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Schätzung.

Man kann zwei Arten von Informationen unterscheiden: allgemeingültiges Wissen und projektspezifisches Wissen. Während allgemeingültiges Wissen auf alle ähnlichen Sachverhalte adaptierbar ist, gilt projektspezifisches Wissen hauptsächlich für das jeweilige Projekt. Die Qualität einer Schätzung hängt von beidem ab.

Beispiele für allgemeingültiges Wissen sind:

- Eine Baumaschine erbringt nicht immer dieselbe Leistung, da diese von den jeweiligen Randbedingungen und dem Fahrer abhängt
- Die Witterungsbedingungen in nördlichen Breitengraden sind kälter als in südlichen
- In hohen Regionen ist mit kaltem Wetter zu rechnen
- In der Regel kann ein Bagger B in Projektumgebung X eine durchschnittliche Leistung von Q erbringen und diese schwankt zirka zwischen $Q_{\min}$ und $Q_{\max}$.

Beispiele für projektspezifisches Wissen sind hingegen:

- Die Arbeiten im Bereich X fangen gemäß Terminplan am Datum Y1 an und enden an Y2
- In der Periode zwischen Y1 und Y2 ist mit Witterung Z zu rechnen
- Am Arbeitsort der Baumaschinen in Periode Y1 ist mit engen Platzverhältnissen zu rechnen
- Herr *Mustermann* ist krank und fällt für die Dauer T aus, da kein Ersatzfahrer für den LKW von Herrn *Mustermann* gefunden werden konnte, ist damit zu rechnen, dass die Transportleistung geringer ist. Des Weiteren hat dies Auswirkungen auf die Baggerleistung und ggf. auf die Einbauleistung.

All dies sind nur exemplarische Beispiele dafür, dass bestimmte Informationen nur zu bestimmten Zeitpunkten zur Verfügung stehen, während andere quasi ständig zur Verfügung stehen.

- **Je kürzer ein zu planender Zeitabschnitt vom Datum der Planungserstellung entfernt ist, desto geringer sind die Varianz und der Mittelwert einer Abschätzung des Materialbedarfs bzw. der Leistungsfähigkeit eines Produktionsprozesses (bei einer gegebenen akzeptierten Irrtumswahrscheinlichkeit)²⁸⁰ aufgrund der mit näher rückendem Ausführungsdatum steigenden Informationsmenge über den abzuschätzenden Sachverhalt.**

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei langen Prognosehorizonten neigen Bauunternehmen dazu Zeitpuffer in die Ausführungsplanung einzubauen²⁸¹.

²⁸⁰ Ballard spricht in diesem Zusammenhang vom "window of reliability". Im Unterschied zu dem hier aufgestellten Modell unterstellt er für dieses "Zeitfenster" absolute Zuverlässigkeit. D.h. falls eine Prognose in diesem "Zeitfenster" ist, tritt ihre Vorhersage auch mit absoluter Sicherheit ein. Seine Idee hierbei ist, dass nur Ereignisse, die mit absoluter Sicherheit eintreten, als Grundlage für den Anstoß weiterer Ereignisse verwendet werden (vgl. (Ballard 2000c).

²⁸¹ Mattila und Bowman untersuchen die Genauigkeit von Terminplänen von Bauunternehmen im Straßenbau. Die Ergebnisse beziehen sich hauptsächlich auf den Oberbau der Straße. Die Interpretation der Studien, die an

Eine Studie 258 unterschiedlicher internationaler Transportinfrastrukturmaßnahmen von Flyvbjerg, Holm und Buhl hat gezeigt, dass die Projektkosten zu Beginn in 9 von 10 Fällen unterschätzt werden. Im Mittel werden die Kosten um 20% unterschätzt, mit einer Standardabweichung von 30% (vgl. (Flyvbjerg et al. 2002)). Da die Kostenschätzung insbesondere auf der Prognose von Dauern für Aktivitäten basiert, kann davon ausgegangen werden, dass diese Werte auch qualitativ repräsentativ für die Prognose von Aktivitätsdauern sind. Des Weiteren, werden Aktivitätsdauern auf der Basis von prognostizierten Leistungswerten bestimmt, womit ebenfalls deren Ungenauigkeit hieraus abgeleitet werden kann.²⁸²

Einer der wesentlichen Einflussfaktoren für die Entwicklung der Steigung der Vertrauensgrenzen ist die Komplexität²⁸³ des Systems. Indikatoren für steigende Komplexität sind insbesondere: Projektgröße, Variation, Interdependenz²⁸⁴ und Kontextualität (vgl. (Vidal & Marle 2008)). Im Wesentlichen sind es somit die Anzahl der einzelnen Entitäten²⁸⁵ der Bauproduktion, deren Vernetzungsgrad, die Stabilität der Vernetzungen und der zugehörige Systemkontext²⁸⁶, die den Komplexitätsgrad bestimmen.

Je komplexer ein System ist, desto schwerer ist es beschreibbar. Des Weiteren gilt, dass steigende Komplexität dazu führt, dass das Systemverhalten tendenziell schwerer vorhersagbar ist. Neben dem Einfluss auf die Vorhersagbarkeit des Systemverhaltens hat Komplexität einen deutlichen Einfluss auf die Kontrollierbarkeit des Systems.²⁸⁷

Hieraus folgt, dass Projekte mit einem höherem Komplexitätsgrad eine deutliche größere Steigung der oberen Vertrauensgrenzen (bzw. geringere für den Fall der unteren Vertrauensgrenze) haben. Dies hat unter anderem zur Folge, dass der Umfang der Produktionsplanung an die der Prognose unterliegenden Unsicherheit angepasst werden muss (vgl. (Laufer 1991)).

Außerdem ist davon auszugehen, dass ab einem gewissen Prognosehorizont der Informationsgehalt kurzzeitig überproportional abnimmt²⁸⁸. Dieser Aussage liegt zu Grunde, dass das Verhalten des komplexen Systems (Erd-)Baustelle für einen kurzfristigen Zeithorizont relativ gut vorhersagbar ist²⁸⁹. Ursache hierfür ist, dass die Baustellenrandbedingungen in diesem Zeitraum besser bekannt sind (z.B. Witterung, Bodeneigenschaften, Geräteauslastung usw.). Wird dieser Zeithorizont überschritten, dann steigen die oberen Vertrauensgrenzen kurzfristig überproportional an (bzw. die unteren

mehreren Projekten durchgeführt wird, kommt zu dem Ergebnis, dass die Dauer von Aktivitäten generell überschätzt wird (vgl. (Mattila & Bowman 2004)).

²⁸² Anzumerken ist an dieser Stelle, dass das Ergebnis von Flyvbjerg nicht mit Fußnote 281 konsistent zu sein scheint. Die Abweichung könnte aber auch daran liegen, dass die Bauunternehmen kostenneutrale Puffer einplanen. Hauptziel an dieser Stelle ist auf die Varianzen der Planungsgüte aufmerksam zu machen.

²⁸³ Vidal und Marle schreiben hierzu passen: „... real project complexity entails the project manager's inability to forecast efficiently both the impact of its decisions and the project evolution.“ (Vidal & Marle 2008).

²⁸⁴ Hierzu schreibt Liu et al.: „Variations in timely completion of tasks can be high and can have significant impact on successors' productivity.“ (Liu et al. 2011)

²⁸⁵ Unter Entitäten sind in dem hier vorgestellten Zusammenhang insbesondere die Objekte eines Bauprojekts (Bauherr, Bauleiter, Poliere, Baumaterial, Baumaschinen, Informationen etc.), aber auch deren Gruppenzugehörigkeiten (Unternehmen, Arbeitsteam, Prozesszugehörigkeiten etc.) zu verstehen. Der Begriff „Entität“ ist somit abstrakt. Er bildet gedanklich die Knotenpunkte des Netzwerks der Abhängigkeiten (und das auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen).

²⁸⁶ Der Systemkontext legt fest, auf welcher Ebene die Entitäten betrachtet werden und welche Randbedingungen zu berücksichtigen sind.

²⁸⁷ vgl. (Vidal & Marle 2008).

²⁸⁸ Bertelsen schreibt hierzu. „As the system is near chaotic, management must be based upon the fact that execution will be unpredictable in detail more than a few steps into the future.“ (Bertelsen 2003)

²⁸⁹ Goldrat schreibt hierzu passend: „Almost every plant has a forecast of demand which is quite reliable for some period of time into the future, then the validity of the forecast drastically deteriorates within a very short period of time.“ (Goldratt 1990)

Vertrauensgrenzen flachen kurzfristig überproportional ab). Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5-10 schematisch dargestellt. Die Distanz der überproportionalen Änderung der Steigung von Ursprung hängt von der jeweiligen Systemstabilität ab.

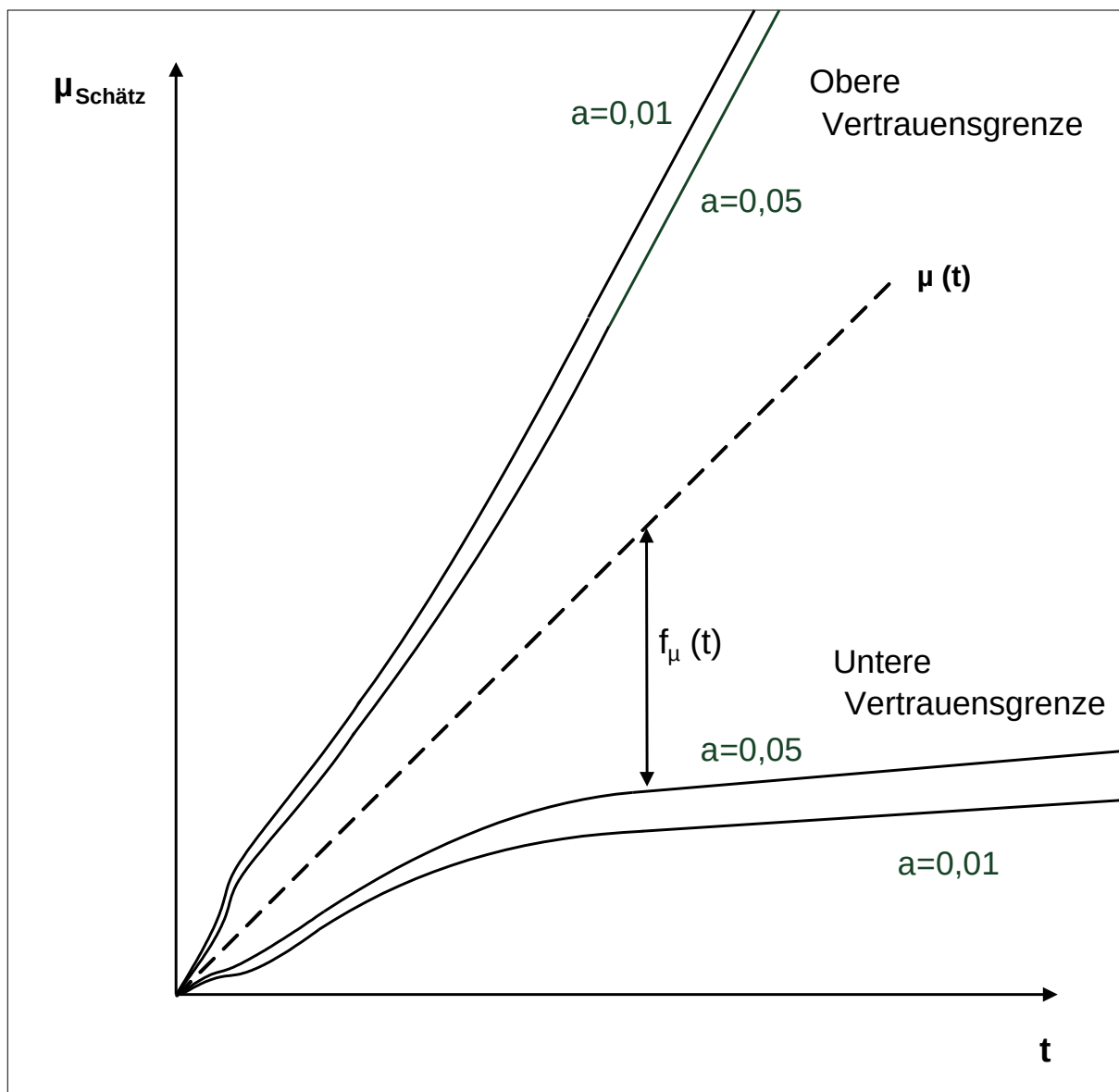


Abbildung 5-10: Einfluss des überproportionalen Abfalls des Informationsgehalts ab einem gewissen Zeitpunkt²⁹⁰

Weitere Erkenntnisse sind:

- In der Planung ist darauf zu achten, wie sich bei Festlegungen die Entwicklung der Schätzungen der Mittelwerte (bzw. Standardabweichungen) und die zugehörigen Vertrauensintervalle eines Sachverhaltes verändern.

²⁹⁰ Diese Darstellung geht von unabhängigen Wahrscheinlichkeiten aus. Vorgänge wie „Lernen“ etc. (Stichwort kontinuierliche Verbesserungen) sind nicht berücksichtigt.

- **Je größer die Steigung der oberen Vertrauensintervalle²⁹¹ der Schätzung des Mittelwerts (bzw. der Standardabweichung), desto kleiner müssen die Steuerungsintervalle gewählt werden²⁹².**

Die in Abbildung 5-10 dargestellten Steigungen des Mittelwerts und der Vertrauensgrenzen sind in der Realität meistens nicht stetig. In der Bauproduktionsplanung werden bestimmten Tätigkeiten bestimmte Zeitfenster zugewiesen. Die Randbedingungen unterschiedlicher Zeitfenster müssen keinesfalls identisch sein²⁹³. Bei der Festlegung der Zuordnung einer Tätigkeit zu einem Zeitfenster ist dies zu beachten.

Beispielsweise wird die Steigung des Mittelwerts und der Vertrauensgrenzen der Leistungsfähigkeit einer Aushubtätigkeit dadurch beeinträchtigt, zu welcher Jahreszeit sie eingeplant wird. Ein weiteres anschauliches Beispiel ist der Unterschied der Steigung der Mittelwerte der Leistungsfähigkeit zweier Prozesse, die entweder sequenziell oder parallel an einem Ort ausgeführt werden. Bei paralleler Ausführung könnten sich die Prozesse gegenseitig behindern.

Der bisherige Begriff "Informationsgehalt" kann auch durch den aus dem Risikomanagement bekannten Begriff "Unsicherheit" ersetzt werden. Letztlich resultieren aus mangelnden Informationen Unsicherheiten bezüglich eines Systemzustands²⁹⁴. Gleichzeitig impliziert der Begriff Unsicherheit, dass ein gewisser Informationsgehalt - d.h. ein bestimmtes Wissen bezgl. eines Sachverhaltes - vorhanden ist (d.h. es ist nicht mit Sicherheit festzustellen, welcher Zustand eintritt, aber die Eintrittswahrscheinlichkeiten sind bekannt oder können abgeschätzt werden). Ist keine Information bezgl. eines Sachverhaltes vorhanden, so würde man von "Unwissen" sprechen (es wäre somit keine Aussage bezüglich der Entwicklung der Mittelwerte und Vertrauensgrenzen möglich und etwaige Konsequenzen hieraus sind ebenfalls unbekannt). Sind nur die möglichen Konsequenzen bekannt, dann würde man von "Ungewissheit" sprechen (es wäre somit keine Aussage bezüglich der Entwicklung der Mittelwerte und Vertrauensgrenzen möglich). Dem gegenüber folgt aus „Sicherheit“, dass die eintretende Situation bekannt ist (d.h. deterministische Entscheidungen treten ein).

Betrachtet man nun eine diskrete Aufgabe, die geplant wird, so ist die Leistungsprognose abhängig von dem für die Aufgabe angedachten Zeitfenster. Grundsätzlich gilt, dass tendenziell mehr Informationen über ein zeitnahes Fenster zur Verfügung stehen, als für eines, das weit in der Zukunft liegt. Dies muss allerdings nicht zwangsweise sein, z.B. falls die Randbedingungen in einem weiter in der Zukunft liegenden Zeitfenster besser abgeschätzt werden können - bzw. mehr Informationen zu diesem Zeitfenster zur Verfügung stehen -. Aufgrund der Möglichkeit, dass in jedem Zeitfenster andere Randbedingungen vorherrschen können, kann sich der Mittelwert und die Vertrauensgrenze je nach den existierenden Randbedingungen entwickeln (größer oder kleiner und beide Werte - Mittelwert und Vertrauensgrenze - auch unabhängig voneinander). Ausgewählte Situationen sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

²⁹¹ Umgekehrtes gilt entsprechend für die unteren Vertrauensintervalle.

²⁹² Eine Gegensteuerung hat umso mehr Effekt, je kleiner die Steuerungsintervalle gewählt werden. Dies gilt jedoch nur bis zu einer spezifischen minimalen Intervallgröße.

²⁹³ In der Realität werden diese sogar immer zumindest infinitesimal voneinander abweichen.

²⁹⁴ Salem et al. schreiben hierzu: „In construction projects, significant uncertainty exists throughout the project. Weather conditions, soil conditions, owner changes, and the interaction between multiple operations can produce unique circumstances ...” (Salem et al. 2006)

Die Existenz der Randbedingungen hängt wiederum im Fall von Varianten teilweise von Entscheidungen ab, die in der Planungsphase getroffen werden.²⁹⁵

Das hier aufgestellte Modell hat nur begrenzte Gültigkeit, da es gleichzeitig der Dynamik von Gruppenentscheidungen und der aus dem strategischen Verhalten von Gegenspielern resultierenden Verhalten ausgesetzt ist²⁹⁶. Des Weiteren treten die Situationen Sicherheit, Unsicherheit, Ungewissheit und Unwissen auch parallel auf.

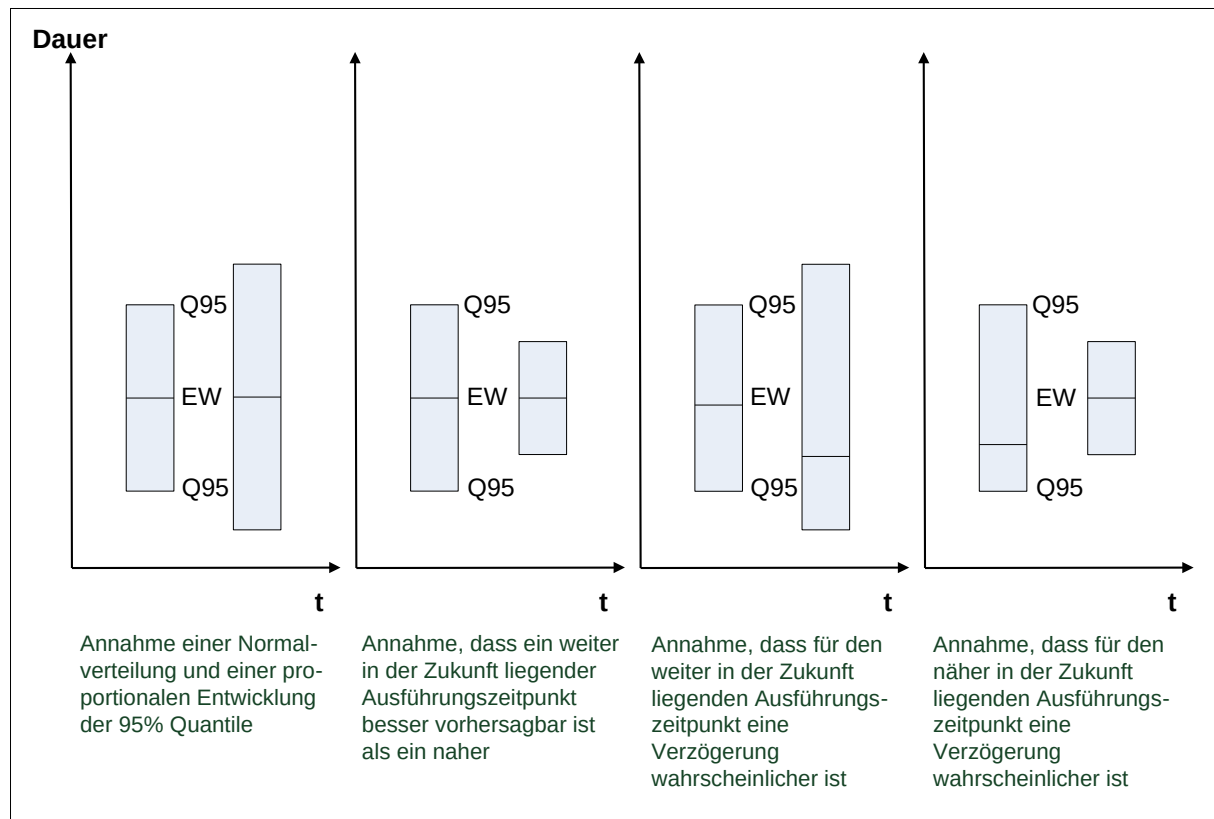


Abbildung 5-11: Die zeitabhängige Entwicklung der Vertrauensintervalle und des Mittelwerts einer prognostizierten Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen

In der Wissenschaft haben sich unterschiedliche Autoren der Verbesserung der Prognose der Leistungsfähigkeit im Rahmen von Erdbautätigkeiten gewidmet. Die Ansätze lassen sich im Wesentlichen in drei Themengebiete unterteilen: Deterministische Berechnungen basierend auf Multiplikations- und Additionsmethoden (vgl. (Hüster 2005), (Girmscheid 2010c), (Kuhlmann 2011), (Bauer 2006), (Eymer et al. 2007), (Caterpillar 2007) und (Gehbauer 2004)), stochastische Berechnungen auf Basis der Warteschlangentheorie (vgl. (Carmichael 1987)²⁹⁷) und

²⁹⁵ D.h. Randbedingungen werden in der Planung bereits festgelegt (z.B. Vernetzungsgrad, Interaktionsgrad, in der Planung zugeteiltes Zeitfenster usw.). Diese festgelegten Randbedingungen haben wiederum Auswirkungen auf die vorhandenen Informationen bzgl. eines Systems.

Des Weiteren ist der Eintritt und die Ausprägung der Randbedingungen ebenfalls sicher, unsicher oder ungewiss.

²⁹⁶ Chu al. schreibt hierzu im Zusammenhang mit komplexen Systemen: "However, it seems unlikely that one can predict or control phenomena that evade description in terms of a well-defined system..." (Chu et al. 2003)

²⁹⁷ Diese Quellenangabe basiert auf einer Review von Hokstad (Hokstad 1987). Eine generelle Erläuterung der Warteschlangentheorie ist in (Arnold & Furmans 2009) zu finden. Generell gilt allerdings, dass die Warteschlangentheorie aufgrund von der zusammenhängenden Komplexität kaum geeignet ist, um reale Sachverhalte darzustellen. Gehbauer schreibt hierzu: "Nach dem Optimieren mit Warteschlangenmodellen und damit der analytische Lösungsweg wegen der Komplexität der Transportvorgänge keinen Ausweg bietet und auf

Simulationsverfahren anhand deterministischer oder stochastischer Modelle (vgl. exemplarisch (Gehbauer 1974), (A. Ji et al. 2009), (S. D. Smith et al. 2000) (Günthner et al. 2009), (Wimmer et al. 2010))²⁹⁸ ²⁹⁹. Neben der reinen Bestimmung von Leistungsfähigkeiten einzelner Prozesse (oder Prozessgruppen) sind wissenschaftliche Arbeiten im Rahmen der Terminplanung entstanden, die verknüpfte Produktionsprozesse auf einer aggregierteren Ebene betrachtet haben und erweitern somit die klassischen Verfahren der CPM- und PERT-Methode³⁰⁰ (vgl. exemplarisch (Börkircher 2011), (Freundt et al. 2004)³⁰¹, (Zhang & Li 2004), (D.-E. Lee 2005), (Vaziri et al. 2007) und (Barraza 2011))³⁰². Allen Vorgehensweisen ist gemein, dass bestimmte Eingangsparameter im Vorhinein abgeschätzt oder bestimmt werden müssen, und dass Veränderungen bezüglich des Bauproduktionssystems häufig aufwendig ergänzt werden müssen³⁰³. Des Weiteren unterliegen sie den notwendigen anzunehmenden Vereinfachungen einer Systemmodellierung, d.h. die Komplexität des realen Systems wird stark reduziert oder isoliert betrachtete Problemstellungen werden analysiert bzw. optimiert.

Interessante Ergebnisse in diesem Zusammenhang liefert Puddicombe (2006), der in einer umfassenden statistischen Auswertung unterschiedlicher Projekte keinen Zusammenhang zwischen einer umfangreichen und frühen Planung (d.h. langer Planungshorizont) und dem Projektergebnis feststellen kann. Vielmehr stellt er fest, dass eine kurzfristige projektbegleitende Planung (d.h. mit kurzem Planungshorizont) einen erheblichen Einfluss auf das Projektergebnis hat. Insbesondere bei komplexen Projekten scheint der Einfluss einer frühen umfangreichen Planung aufgrund der hohen inhärenten Projektdynamik zu sinken (vgl. (Puddicombe 2006)). Diese Feststellung unterstützt die in dem hier vorgestellten Modell unterstellte Abhängigkeit zwischen der Verfügbarkeit von Informationen bzgl. eines Planungszeitraums und der Entwicklung des Vertrauensintervalls für den Mittelwert (bzw. der Standardabweichung) von Leistungsprognosen.

Zunächst ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass das hier aufgestellte Modell nur zur Erläuterung der Komplexität von Prognosen dient, die ein wesentlicher Teil der Bauproduktionsplanung sind³⁰⁴. Bezogen auf die Realität ist es sehr schwierig - wenn nicht sogar unmöglich - ein Modell der Bauproduktionsplanung zu erstellen. Dies liegt daran, dass dieses Modell sämtliche relevante Ursache-Wirkungsbeziehungen abbilden müsste. Ein kleines Beispiel soll dies erläutern:

- Ein Bauunternehmen plant seine Erdarbeiten in einem bestimmten Abschnitt. Die Planung hängt zunächst von dem vertraglich vereinbarten Rahmenterminplan ab. Darüber hinaus hängt diese von den möglichen Beziehungen zu weiteren Tätigkeiten ab, z.B. aus dem Bereich des Brücken- oder Tunnelbaus bei der Erstellung einer Trasse (und hier somit erneut mit den jeweiligen detaillierteren Tätigkeiten wie z.B. Schalen, Bewehren usw.). Gleichzeitig hängt die Planung von den Witterungsverhältnissen und Bodenverhältnissen ab. Neben den sich

einfachste Modelle beschränkt bleiben muß, kommt nur die stochastische Simulation in Betracht." (Gehbauer 1974)

²⁹⁸ Ähnliche Simulationsverfahren sind auch für den Hochbau erstellt worden. Aufgrund der Verknüpfung zu bestehenden CAD-Daten und der grundlegend sehr ähnlichen Vorgehensweise sei exemplarisch (Weber 2007) erwähnt.

²⁹⁹ Hierbei ist zu erwähnen, dass in den meisten Simulationen nicht für alle Prozesszeiten stochastische Schwankungen unterstellt werden. Insofern handelt es sich oft um Kombinationen von stochastischen und deterministischen Verfahren, die wiederum ein stochastisches Gesamtergebnis ergeben.

³⁰⁰ Zur Abgrenzung der CPM und PERT-Methode siehe (D.-E. Lee 2005).

³⁰¹ Freund et al. (2004) basiert konkreter auf der sog. Theorie der Fuzzy Logic.

³⁰² Insbesondere in der Kostenplanung und im Risikomanagement sind weitere Arbeiten vorhanden.

³⁰³ Im Umkehrschluss wäre es theoretisch auch möglich, alle möglichen Varianten im Modell vorzusehen. Dies ist allerdings aufgrund des exponentiell steigenden Modellierungsaufwands, auf der einen und aufgrund des Unvermögens alle Varianten im Vorhinein zu identifizieren auf der anderen Seite nicht möglich.

³⁰⁴ und in diesem Zusammenhang nur für einen bestimmten Ausschnitt der Komplexität.

hieraus ergebenden Beziehungen und Bedingungen ist die Verfügbarkeit von Bauproduktionsfaktoren zu überprüfen. Für die Ausführung der Tätigkeiten werden Baumaschinen benötigt, die entweder aus dem unternehmenseigenen Bestand oder aus einem Mietpark stammen. Gleichzeitig bearbeiten Firmen üblicherweise mehrere Projekte und es entsteht ein Konflikt bei der Nachfrage bestimmter Bauproduktionsfaktoren (z.B. Arbeitskräfte oder Baumaschinen). Somit besteht auch eine Abhängigkeit gegenüber anderen Baustellen. Die in einem Unternehmen befindlichen Baumaschinen hängen von den zu erwartenden Aufträgen ab (gleiches gilt im Wesentlichen auch für den Mietpark). Diese hängen wiederum von der volkswirtschaftlichen Situation des Landes ab - insbesondere im Falle von öffentlichen Auftraggebern - ³⁰⁵.

Das Beispiel berücksichtigt nur einzelne exemplarisch ausgewählte Zusammenhänge. Dennoch zeigt es die real auftretende Komplexität der Aufgabe der Bauproduktionsplanung.

Trotz der starken Komplexitätsreduzierung können einige Erkenntnisse aus den in diesem Kapitel erläuterten Zusammenhängen gewonnen werden. Die theoretische Analyse bezüglich der Ermittlung von Prognosen bei der Produktionsplanung im schweren Erdbau hat folgende wesentliche Punkte ergeben³⁰⁶:

- **Verwendung kurzer Planungshorizonte³⁰⁷**
- **Verbesserung der Informationsakquirierung**
- **Durchführung der Planung zum spätest möglichen Zeitpunkt³⁰⁸**
- **Berücksichtigung von Beeinträchtigungen durch Festlegungen**
- **Anwendung kleiner Steuerungsintervalle bei Prozessen, die entweder hoher Unsicherheit, hoher Ungewissheit oder Unwissen - oder Kombinationen dieser³⁰⁹ - unterworfen sind. Wobei die Wahl der Größe der Steuerungsintervalle von den zu erwartenden Auswirkungen abhängt.**

Dem gegenüberzustellen ist das Ergebnis einer Studie von Chong et al. (2011), nach der sich Planer zur Abschätzung bzw. Ermittlung von Leistungswerten insbesondere eine bessere Übereinstimmung zwischen Planung und Realität wünschen (vgl. (Chong et al. 2011)). Gleichzeitig betonen Chong et al. (2011) die wichtige Rolle der Einschätzung auf Basis von Erfahrungswissen³¹⁰.

³⁰⁵ Eine Erläuterung dieses unter den Fachbegriffen "Offene Systeme" und "Kontextualität" bekannten Problems ist in (Chu et al. 2003) zu finden.

³⁰⁶ In (Laufer 1991) ist ein guter kurzer Abriss zur Empfehlung im Umgang mit Komplexität und einer angepassten Bauproduktionsplanung zu finden.

³⁰⁷ Ballard bekräftigt diese Feststellungen: "When environments are dynamic and production system is uncertain and variable, reliable planning cannot be performed in detail much before the events being planned." (Ballard 2000c)

Laufer gibt hierzu weitere Empfehlungen bezüglich des Umgangs mit Unsicherheiten in der Bauproduktionsplanung (Laufer 1991).

Die Größe der Planungshorizonte und der Detaillierungsgrad der Planung hängt von dem Grad der involvierten Variabilität und Unsicherheit der betrachteten Sachverhalte ab (vgl. (Formoso & Isatto 2009)).

³⁰⁸ Chong et al. schreibt hierzu: "In most production rate estimates at the design phase, uncertainties during production cannot be predicted, and thus designers cannot include them in the schedule"(Chong et al. 2011).

³⁰⁹ Bei Kombinationen reichen evtl. schon moderate Unsicherheit und moderate Ungewissheit.

³¹⁰ "Combining experience with reliable scheduling tools is the solution to more reliable construction project scheduling." (Chong et al. 2011)

Lean Management im Bauwesen bietet Ansätze, die zur Lösung der obigen Punkte beitragen. Das LPS (vgl. Kapitel 2.4.5) ist z.B. ein Ansatz, der zur Lösung aller aufgelisteten Punkte beiträgt. Darüber hinaus existieren weitere Ansätze, die einzelne Punkte aufgreifen wie z.B. Gemba³¹¹ oder Visuelles Management (vgl. Kapitel 2.4.6).

Abschließend ist als wesentliche Kritik an diesem Modell festzustellen, dass nicht erklärt werden kann, wie Informationen fließen. Zur Verteidigung ist anzumerken, dass das Modell nur die Auswirkungen der Länge von Prognosehorizonten und den mit ihnen verbundenen Wahrscheinlichkeiten von Systemzuständen qualitativ abbildet und nicht die Art und Weise, wie Informationen sich ausbreiten.

5.1.3.3 Anreiz für kontinuierliche Verbesserung durch das Pull-Prinzip

Das Pull-System ist dadurch gekennzeichnet, dass es im Voraus eine maximal zulässige Gesamtzahl an Zwischenprodukten definiert, die ein Prozess produzieren darf, bevor der Nachfolgeprozess diese Zwischenprodukte abrufen (vgl. (Hopp & Spearman 2011)). Die Festlegung der maximal zulässigen Gesamtzahl an Zwischenprodukten hat zum Ziel, dass zum einen unmittelbar die Anzahl der Zwischenprodukte (welche gleichzusetzen mit Beständen sind) reduziert wird. Zum anderen führt eine Reduktion der Pufferung - die durch die Limitierung erfolgt - dazu, dass nicht identifizierte Produktionsprobleme, aufgrund einer mangelnden Pufferung (in Form von Zwischenprodukten), eine direkte Leistungsreduzierung der Produktion zur Folge hat. Hieraus resultiert ein unmittelbarer Anreiz zur Problemidentifizierung und -beseitigung. Insofern geeignete Ansätze zur Problembeseitigung gefunden und umgesetzt werden, können auf diese Weise überflüssige Verschwendungselemente innerhalb der Produktionsprozesse beseitigt werden. Eine bessere Produktion kennzeichnet sich insbesondere durch geringere Mittelwerte und Standardabweichungen bzgl. der Prozessdauern (vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.1.2). Im Anschluss an eine Verringerung der Mittelwerte und Standardabweichung der Prozessdauern wird die zulässige Gesamtzahl der Zwischenprodukte verringert. Der beschriebene Ablauf ist eine Variante, um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (vgl. Kapitel 2.2.1) in Gang zu setzen und diesen aufrecht zu erhalten. Der Gesamtprozess ist in Abbildung 5-12 dargestellt.

³¹¹ Gemba bedeutet Informationen dort zu akquirieren wo sie auch anfallen, d.h. am „Ort des Geschehens“. D.h. Problemidentifizierung beginnt mit Datenaufnahme vor Ort.

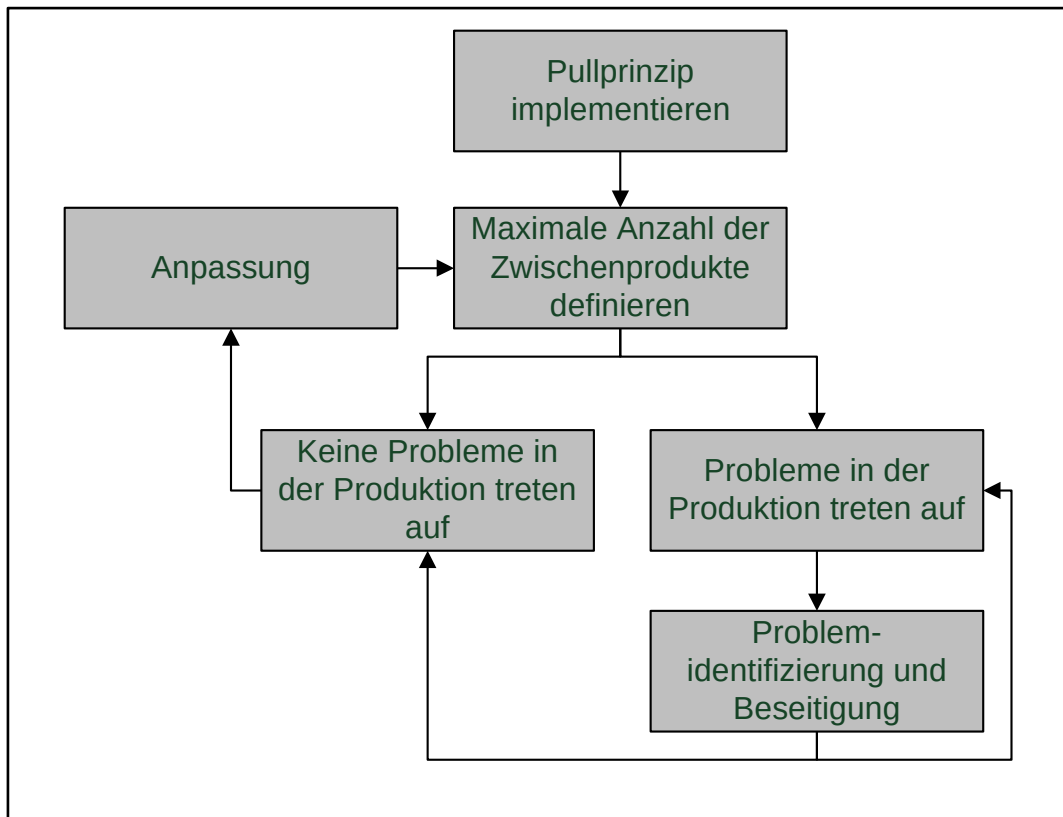


Abbildung 5-12: Ablauf der kontinuierlichen Verbesserung durch Implementierung des Pull-Prinzips

Bei einem Produktionssystem, das durch ein Push-System gesteuert wird, arbeiten die einzelnen Arbeitsstationen des Systems immer, solange Vorprodukte verfügbar sind. Dies führt dazu, dass das System sich mit unnötig vielen Zwischenprodukten füllen kann. Gleichzeitig wird durch dieses Vorgehen die Auslastung der einzelnen Arbeitsstationen zunächst hoch gehalten, da kein Arbeitsstillstand aufgrund des Erreichens eines maximal zulässigen Zwischenproduktstandes eintritt. Bei fast allen, durch das Push-Prinzip gesteuerten Produktionssystem, wird allerdings ab einem gewissen Grad durch das Management eingegriffen und verhindert, dass weitere Zwischenprodukte produziert werden. Das Pull-Prinzip reagiert deutlich früher und hält die Teile des Produktionssystems an, die unnötig viele Zwischenprodukte produzieren.

Die Ansammlung von Zwischenprodukten bzw. Puffern kann negative Konsequenzen für die Produktion haben. Diese sind insbesondere:

- Hohe Verweilzeiten der Zwischenprodukte in der Produktion
- Hohe Fertigstellungsdauern
- Verringerung der Flexibilität der Produktion
- Steigerung von Prozessdauern³¹²
- Verringerung der Prozesstransparenz

³¹² Vgl. Kapitel 5.1.1.

5.1.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Ein Ansatz des Lean Managements ist das Pull-Prinzip anzuwenden. Gleichzeitig ist ein weiteres Ziel die Bestände zu minimieren, was in dem theoretisch anzustrebenden Ziels des One-Piece-Flow (OPF) mündet (d.h. Produktion nach Bedarf und mit minimalen Losgrößen). Auf Bedarf ohne große Bestände zu produzieren macht es erforderlich, kurze Durchlaufzeiten zu realisieren. OPF führt damit indirekt zu minimalen Durchlaufzeiten. Des Weiteren wird es deutlich einfacher den Bedarf zu planen, da OPF zur Folge hat, dass minimal in die Zukunft geplant werden muss (genau eine Einheit). Insofern hängen diese Ansätze untrennbar miteinander zusammen und müssen gemeinsam untersucht werden, diesem Ansatz ist die Analyse gefolgt.

Das Ziel ist generell minimale Durchlaufzeiten bei hoher Systemauslastung zu erreichen. Dies ist nur möglich, wenn die die Standardabweichungen der Prozesszeiten und die Mittelwerte der Prozesszeiten reduziert werden können.

In Kapitel 5.1.3.1 wurde der theoretisch optimale Leistungsbedarf analysiert (d.h. es wurde analysiert, wie groß der optimale Leistungsbedarf einer Arbeitsstation ist). Ergebnis ist, dass der optimale Leistungsbedarf sowohl vom Erwartungswert als auch von der Standardabweichung der Bedarfe und den mit Materialüberschüssen bzw. mit -mangel zusammenhängenden Konsequenzen abhängt. Da der Mittelwert und die Standardabweichung der Bedarfe wiederum vom Planungshorizont abhängen wurde dieser Zusammenhang in Kapitel 5.1.3.2 analysiert.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass z.B. aufgrund der örtlichen Trennung zwischen Aushub und Einbau und der Schwankungen in Beladezeiten, Transportzeiten und Einbauzeiten eine Pufferung durchaus sinnvoll ist³¹³. Ziel ist es jedoch Prozessschwankungen möglichst zu eliminieren (d.h. Zielwert der Standardabweichung ist 0), so ist im „theoretischen Idealfall“ der einzige Bestand derjenige, der in den Transportfahrzeugen auf dem Weg zum Einbauort ist und der gerade bearbeitet wird.

Anhand Abbildung 5-6 und der zugehörigen Formeln ist erkennbar, dass bei deterministischem Bedarf die Bestellmenge diesem deterministischen Bedarf gleicht (unabhängig vom jeweiligen Faktor c). Werden nun des Weiteren minimale Losgrößen eingeführt, so nähert sich die Bestellmenge dem Wert „eins“ und somit dem One-piece-Flow. Aus theoretischer Sicht ist somit der One-Piece-Flow auch im Erdbau erstrebenswert (wenn auch real bisher nicht umsetzbar).

Der wesentlichste Punkt, der für die Gültigkeit des theoretischen Ziels einer Etablierung eines „One“-Piec-Flow im Erdbau spricht, ist jedoch ein anderer. Die Bestände sind nicht das eigentliche Problem³¹⁴, sie sind Folge der sie verursachenden Probleme. Bestände oder Puffer in Form von Kapazität, Zeit oder Zwischenprodukten überdecken die eigentlichen Probleme einer Produktion (sog. Wurzelfehler vgl. Kapitel 2.4.3). Dies hat zur Folge, dass keine kontinuierliche Verbesserung in den durch die Puffer „verschleierte“ Bereichen stattfindet (vgl. Kapitel 2.2.1). Insofern steigert die Minimierung der Puffer insbesondere die Transparenz einer Produktion und macht somit Schwächen sichtbar. Eine gesteigerte Transparenz führt somit dazu, dass Optimierungspotentiale besser identifiziert werden können. Sind Optimierungspotentiale sichtbar und eine Produktion kann aufgrund einer Beschränkung der Bestände keine hohen Auslastungen erreichen, ist der im System vorhandene Druck hoch diese Optimierungspotentiale auszuschöpfen. Dieser Sachverhalt wurde in Kapitel 5.1.3.3 diskutiert.

³¹³ Entsprechendes gilt für weitere Tätigkeiten im Erdbau.

³¹⁴ vgl. hierzu (Goldratt 1990).

5.2 Prozessoptimierung

Eine etablierte Möglichkeit eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien einzuführen ist das Last Planner System (vgl. 2.4.5). Ziel des Last Planner Systems ist die Minimierung von Verschwendung und Variabilität sowie die Umsetzung des Pull-Prinzips (vgl. Kapitel 5.1). Die Wirkungsmechanismen des LPS werden im Folgenden basierend auf den bisherigen Ergebnissen erläutert. Obwohl die Erläuterung sich anhand des LPS orientiert, sind die getroffenen Aussagen generisch und haben somit eine allgemeine Gültigkeit.

Einen besonderen Stellenwert im LPS hat die Verstetigung der Bauproduktionsprozesse. Ein Produktionsprozess kann nur so stark sein, wie sein schwächstes Glied (vgl. Kapitel 3).

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Arbeitsstation nmo ohne Beeinträchtigung ihre Aufgaben ausführen kann ergibt sich zu:

$$P_{nmo} = \sum_{k=1}^{|M_K|} \prod_{i=1, \dots, \overline{i_{nmo}} \wedge e_{ki}=1} P_{nmo_i} \times \prod_{i=1, \dots, \overline{i_{nmo}} \wedge e_{ki}=0} (1 - P_{nmo_i}) \quad (5.48)$$

P_{nmo_i} *Wahrscheinlichkeit, dass Bauproduktionsfaktor i ohne Beeinträchtigung seine Aufgaben an Arbeitsstation nmo ausführen kann*

M_K ist diejenige Definitionsmenge, die alle möglichen Kombinationen abbildet, die zu einer generellen Verfügbarkeit von Arbeitsstation nmo führen.

$$M_K = \{Kombination_1, \dots, Kobination_{|M_K|}\} \quad (5.49)$$

$$A: \{1, \dots, |M_K|\} \times \{1, \dots, \overline{i_{nmo}}\} \rightarrow E, (k, i) \rightarrow e_{ki} \quad (5.50)$$

Die Matrix A repräsentiert die Zusammensetzung der einzelnen Kombinationen. Jeder Kombination ist ein bestimmter Vektor zugeordnet, der die einzelne Kombination abbildet. Matrix A ist somit für jeden Einzelfall aufzustellen, da unterschiedlichste Bauproduktionsfaktor-Kombinationen dazu führen können, dass Arbeitsstation nmo einsatzbereit ist.

Beispiele zur Anwendung von Formel 5.48³¹⁵:

Bsp. 1: $\overline{i_{nmo}} = 1$

$\hookrightarrow |M_K| = 1$ (da nur ein Bauproduktionsfaktor innerhalb von nmo existiert, ergibt sich nur eine Kombinationsmöglichkeit)

$\hookrightarrow A = (1)$

$\hookrightarrow P_{nmo} = P_{nmo_1}$

Bsp. 2: $\overline{i_{nmo}} = 2$

³¹⁵ In Anhang 1 befindet sich ein weiteres Beispiel.

$\hookrightarrow |M_K| = 3$ (Annahme hierbei ist, dass die Verfügbarkeit einer der beiden Bauproduktionsfaktoren dazu führt, dass die Arbeitsstation nmo einsatzbereit ist)

$$\hookrightarrow A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\hookrightarrow P_{nmo} = P_{nmo_1} \times (1 - P_{nmo_2}) + P_{nmo_2} \times (1 - P_{nmo_1}) + P_{nmo_1} \times P_{nmo_2}$$

Bsp. 3: $\overline{t_{nmo}} = 3$

$\hookrightarrow |M_K| = 4$ (Hierbei wir davon ausgegangen, dass nur gewisse Kombinationen zu einer ungestörten Funktion der Arbeitsstation nmo führen. In dem dargestellten Beispiel ist beispielsweise die Funktion von Bauproduktionsfaktor 1 zwingend erforderlich)

$$\hookrightarrow A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\hookrightarrow P_{nmo} = P_{nmo_1} \times P_{nmo_2} \times (1 - P_{nmo_3}) + P_{nmo_1} \times P_{nmo_3} \times (1 - P_{nmo_2}) + P_{nmo_1} \times P_{nmo_2} \times P_{nmo_3}$$

Formel 5.48 verdeutlichen insbesondere wie entscheidend der Einfluss von Produktionsprozessen mit nur einer Kombinationsmöglichkeit (d.h. $|M_K| = 1$) ist. Je mehr Kombinationen existieren (d.h. je flexibler das System bzw. je redundanter), desto wahrscheinlicher ist, dass Arbeitsstation nmo einsatzbereit ist.³¹⁶

Gleichzeitig kann anhand von Formel 5.48 der positive Einfluss von Einsatz-Flexibilität der Bauproduktionsfaktoren abgeschätzt werden. Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls mehrerer betrachteter Bauproduktionsfaktoren ergibt sich durch Multiplikation der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten. Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls sinkt somit mit jedem Bauproduktionsfaktor, der zur Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeit hinzugezogen wird. Können redundante Bauproduktionsfaktoren eingesetzt werden, die mehrere Funktionen innerhalb der Produktion übernehmen können (d.h. sie besitzen eine gewisse Einsatz-Flexibilität) existieren mehrere Kombinationsmöglichkeiten, die zu einer geringeren Gesamtausfallwahrscheinlichkeit führen. Da die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls mehrerer sequenzieller Arbeitsstationen geringer als diejenige des Ausfalls weniger Arbeitsstationen ist, und bestimmte Bauproduktionsfaktoren bis zu einem gewissen Grad flexibel an den Arbeitsstationen eingesetzt werden können, steigt somit die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Produktionssystem ungehindert arbeiten kann.³¹⁷

Das Ziel des LPS ist es P_{nmo} zu steigern, indem Bedingungen geschaffen werden, die dazu führen, dass P_{nmo_i} steigt. Können diese Bedingungen nicht geschaffen werden und ist P_{nmo} zu niedrig, wird die Ausführung der Arbeitsstation nmo durch das LPS nicht freigegeben und verschoben (vgl. Kapitel 2.4.5).

Eine Verstetigung der Produktionsprozesse wird im LPS insbesondere durch die integrierte Betrachtung der Bauproduktionsprozesse und kontinuierliche Verbesserung erreicht. Damit eine integrierte Betrachtung erfolgen kann, ist es zunächst notwendig alle relevanten Sichtweisen auf einen Sachverhalt

³¹⁶ Hieraus folgt gleichzeitig auf welche Bereiche sich ein Total Productive Maintenance (TPM) konzentrieren sollte. TPM sollte die Bauproduktionsfaktoren priorisieren, die in den Kombinationen unersetzlich sind.

³¹⁷ Deutlich erkennbar ist des Weiteren, dass der Vorteil von „Einsatz-Flexibilität“ bei steigenden P_{nmo_i} -Werten sinkt.

zu berücksichtigen. Im Bauwesen sind dies insbesondere die Sichtweisen der einzelnen Baubeteiligten. Jeder am Bau Beteiligte hat individuelle Interessen, die dazu führen, dass seine Sichtweise darauf fokussiert ist, was diesen Interessenbereich tangiert. Identisches gilt für die von Baubeteiligten durchgeführte Planung und Ausführung, die Beteiligten berücksichtigen insbesondere ihren Interessensbereich. Um diesen Sachverhalt zu lösen, werden im LPS alle wesentlich am Bau Beteiligten in die Produktionsplanung und -steuerung integriert. Hieraus folgt, dass die Summe aller zu beachtenden Randbedingungen (d.h. M_{RB} ³¹⁸) für einen bestimmten Bauproduktionsprozess besser bekannt und insbesondere auch früher zugänglich ist und somit nicht - bzw. stark reduziert - erst während der Ausführung unbeachtete Randbedingungen auftreten und zu Schwankungen - inklusiver der bereits erwähnten Nachteile - führen (vgl. Abbildung 5-13).

Ein weiterer wesentlicher Punkt im LPS ist, dass die Randbedingungen dann erfasst werden, wenn sie auch tatsächlich benötigt werden (in Abbildung 5-13 stellen roten Punkte Randbedingungen dar, im Unterschied zur traditionellen Vorgehensweise werden diese Randbedingungen im LPS zu den Zeitpunkten - gemeinsam mit den an dem Bauproduktionsprozess wesentlichen Beteiligten - erfasst, zu denen sie benötigt werden). Um dazu beizutragen, dass Randbedingungen insbesondere dann berücksichtigt werden, wenn diese auch relevant sind, wird die Erfassung der Randbedingungen im LPS in mehrere Phasen unterteilt (vgl. Abbildung 5-13). Dadurch, dass Informationen erst abgerufen werden, wenn sie erforderlich sind, wird vermieden, dass die Menge der Informationen bezogen auf einen betrachteten Sachverhalt unnötig groß wird. Dies hat zur Folge, dass ein Maximum an Transparenz - bezogen auf die Produktionsprozesse - erhalten bleibt.

³¹⁸ Vgl. Kapitel 3.

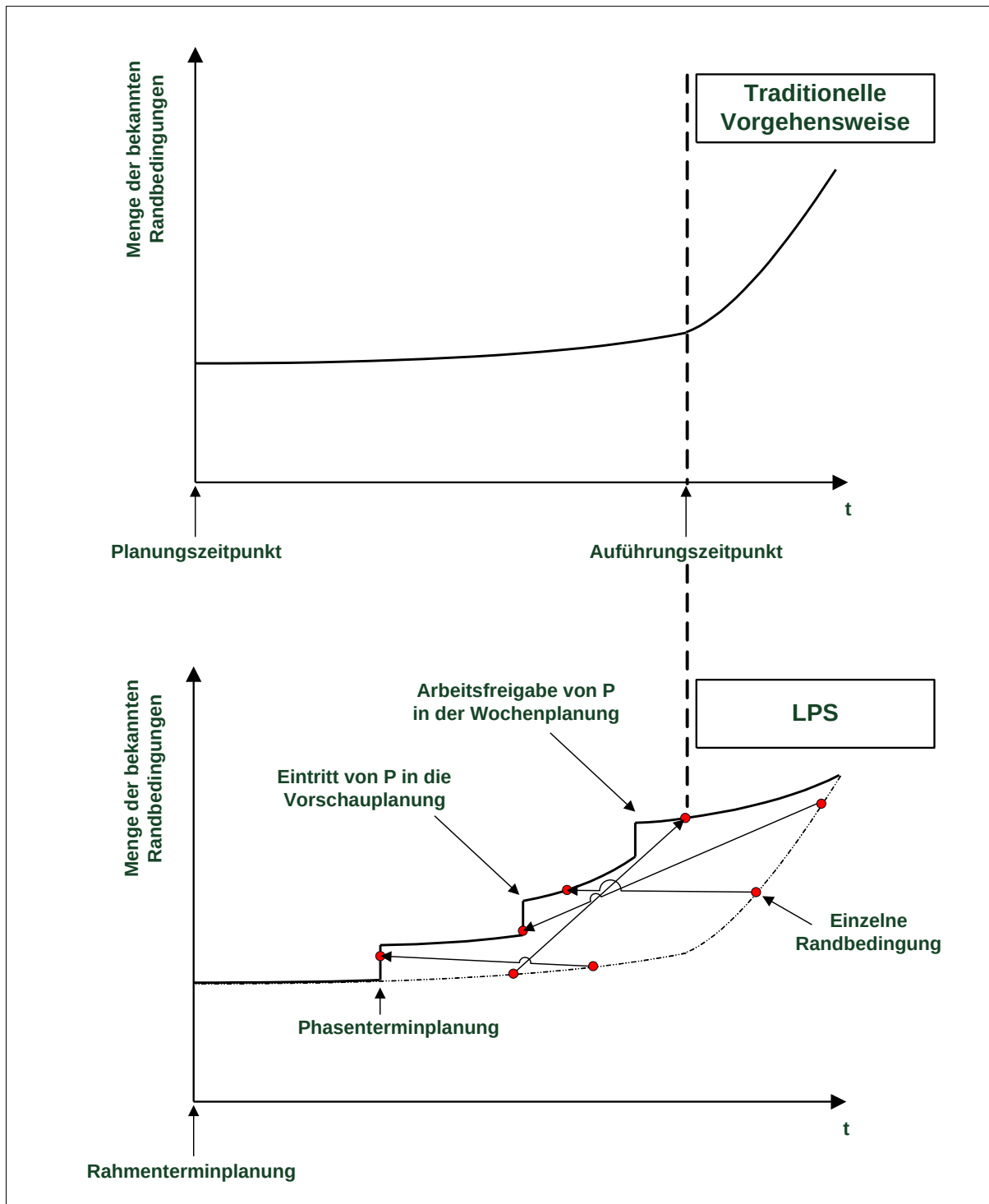


Abbildung 5-13: Unterschied der Erfassung der Randbedingungen für einen Bauproduktionsprozess „P“ zwischen traditioneller Vorgehensweise und Vorgehensweise im LPS³¹⁹

³¹⁹ Die Tagesplanung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Da zur vorzeitigen Identifizierung von Randbedingungen Vorhersagen bzgl. der Zukunft notwendig sind, gelten die in Kapitel 5.1.3.2 dargestellten Zusammenhänge. Hieraus folgt, dass gewisse Randbedingungen allgemein bekannt und somit zu jeder Zeit verfügbar sind, da sie für alle Projekte einer bestimmten Art zutreffen und andere projektspezifische Randbedingungen erst im Verlauf der Projektkonkretisierung verfügbar werden. Während somit die Ebene der allgemein bekannten Randbedingungen jeder Zeit in der Bauproduktionsplanung organisiert werden kann, kann die Ebene der projektspezifischen Randbedingungen erst bei Projektkonkretisierung erfolgen. Diesem Vorgehen folgt das LPS in dem es eine stringente kontinuierliche Detaillierung der Bauproduktionsplanung und -steuerung anstrebt.

Aus der Menge der identifizierten Randbedingungen folgt die Menge der an die Bauproduktion gestellten identifizierten Anforderungen³²⁰, d.h.:

$$M_{RB_identifiziert} \rightarrow M_{AF_identifiziert} \quad (5.51)$$

$M_{RB_identifiziert}$ Menge der identifizierten Randbedingungen

$M_{AF_identifiziert}$ Menge der identifizierten Anforderungen an eine Produktion, die aus $M_{RB_identifiziert}$ resultieren

$M_{RB_identifiziert}$ folgt aus den einzelnen gefundenen Randbedingungen der einzelnen Phasen des LPS.

$$\begin{aligned} M_{RB_identifiziert} = & M_{RB_identifiziert_GTP} \cup \\ & M_{RB_identifiziert_KPP} \cup M_{RB_identifiziert_VP} \cup \\ & M_{RB_identifiziert_WP} \cup M_{RB_identifiziert_TP} \end{aligned} \quad (5.52)$$

$M_{RB_identifiziert_GTP}$ Menge der während der Grobterminplanung identifizierten Randbedingungen einer Produktion

$M_{RB_identifiziert_KPP}$ Menge der während der kooperativen Phasenplanung identifizierten Randbedingungen einer Produktion

$M_{RB_identifiziert_VP}$ Menge der während der rollierenden Vorschauplanung identifizierten Randbedingungen einer Produktion

$M_{RB_identifiziert_WP}$ Menge der während der Wochenplanung identifizierten Randbedingungen einer Produktion

$M_{RB_identifiziert_TP}$ Menge der während der Tagesplanung identifizierten Randbedingungen einer Produktion

Wobei für alle Element innerhalb von $M_{RB_identifiziert}$ gilt, dass insofern Widersprüche zwischen den identifizierten Randbedingungen bzgl. eines Sachverhaltes existieren, die identifizierten Randbedingungen jüngeren Datums vorrangig für gültig erklärt werden. Aus den in Formel 5.51 dargestellten Zusammenhängen folgt entsprechendes für $M_{AF_identifiziert}$.

Eine bessere Kenntnis der Produktionsrandbedingungen führt durch die daraus abgeleitete Menge der Anforderungen $M_{AF_identifiziert}$ jedoch nur zu einer besseren Bauproduktion, wenn zum einen $M_{AF_identifiziert}$ mit den im weiteren Verlauf vorgefunden Anforderungen $M_{AF_vorgefunden}$ übereinstimmen und zum anderen Maßnahmen gefunden werden können, die dazu führen, dass diese identifizierten Anforderungen erfüllt werden können.

³²⁰ Zur Verdeutlichung sei an dieser Stelle aufgeführt, dass unter Anforderungen alle aus den physischen, sozialen und informationsfluss-bedingten Randbedingungen resultierenden Anforderungen zu verstehen sind.

Jede Maßnahme hat eine oder mehrere Zielebenen, d.h. die Umsetzung einer Maßnahme kann zur Erfüllung einer oder mehrere Anforderungen führen.

$$Maßnahme_j \rightarrow M_{AF_erfüllt_j} \quad (5.53)$$

$Maßnahme_j$ $Maßnahme_j, j=1, \dots, \bar{j}$, wobei $\bar{j}$ die Anzahl der umgesetzten Maßnahmen ist
 $M_{AF_erfüllt_j}$ Menge der durch Maßnahme j erfüllten Anforderungen

$$M_{M_AF_erfüllt_ges} = M_{AF_erfüllt_1} \cup \dots \cup M_{AF_erfüllt_j} \quad (5.54)$$

$M_{M_AF_erfüllt_ges}$ Gesamtmenge der erfüllten Anforderungen

Werden die Maßnahmen j durchgeführt, wird deren Wirksamkeit anhand der während der Produktion vorgefundenen realen Randbedingungen und den daraus resultierenden real vorgefundenen Anforderungen beurteilt. Die Differenzmenge $M_{Differenz}$ ist diejenige Menge, die die abweichenden Elemente x zwischen $M_{M_AF_vorgefunden}$ und $M_{M_AF_erfüllt_ges}$ darstellt, d.h.:

$$\begin{aligned} M_{Differenz} &= M_{M_AF_vorgefunden} \setminus M_{M_AF_erfüllt_ges} \\ &:= \{x \mid (x \in M_{M_AF_vorgefunden}) \wedge (x \notin M_{M_AF_erfüllt_ges})\} \end{aligned} \quad (5.55)$$

$M_{Differenz}$ Differenzmenge von $M_{M_AF_vorgefunden}$ und $M_{M_AF_erfüllt_ges}$
 $M_{M_AF_vorgefunden}$ In der Produktion real vorgefundene Anforderungen
 x Elemente der Mengen

Für eine betrachtete Arbeitsstation nmo bzw. einen Bauproduktionsprozess folgt somit:

$$M_{Differenz_nmo} \rightarrow \emptyset \Rightarrow P_{nmo} \rightarrow 1 \quad (5.56)$$

Eine alternative Darstellung ist:

$$|M_{Differenz_nmo}| \rightarrow 0 \Rightarrow P_{nmo} \rightarrow 1 \quad (5.57)$$

D.h. nähert sich $M_{Differenz_nmo}$ einer leeren Menge an bzw. geht die Mächtigkeit von $M_{Differenz_nmo}$ gegen 0 geht die Wahrscheinlichkeit, dass die Arbeitsstation nmo ungehindert ausgeführt werden kann gegen 1.

Betrachtet man $M_{Differenz}$ des Weiteren auf Produktionsfaktorebene (d.h. $M_{Differenz_nmo,i}$) gilt außerdem:

$$|M_{Differenz_nmo,i}| \rightarrow 0 \Rightarrow P_{TC_nmo,i} \rightarrow 0 \quad (5.58)$$

$P_{TC_nmo,i}$ Wahrscheinlichkeit, dass i innerhalb der Arbeitsstation nmo zur Engpassressource wird

Hieraus folgt, dass umso mehr den jeweiligen Bauproduktionsfaktor i betreffende Anforderungen erkannt und entsprechende Maßnahmen j identifiziert und getroffen werden - die zu einer Erfüllung dieser Anforderungen führen - je unwahrscheinlicher wird es, dass i eine Engpassressource innerhalb

der Arbeitsstation nmo wird (vgl. Kapitel 3). Hierbei ist zu ergänzen, dass manche Elemente in $M_{Differenz_{nmo,i}}$ einen deutlich größeren Einfluss auf die Entwicklung von $P_{TC_{nmo,i}}$ haben als andere (z.B. hat die Nichterfüllung der Anforderung einer bestimmten absolut notwendigen Genehmigung eine andere Auswirkung als leicht eingeschränkte Arbeitsflächen). Diese Erkenntnis führt dazu, dass eine Priorisierung der Anforderungen zwingend erforderlich ist, um $P_{TC_{nmo,i}}$ zu minimieren.

Aufgrund mangelnder Kenntnis der Ursache-Wirkungsketten in Kombination mit der mangelnden Möglichkeit, alle Informationen der Bauproduktion zu erfassen und auszuwerten zum einen und der Tatsache, dass einige Einflussparameter wirklich zufallsbasiert - d.h. nicht durch eine Ursache-Wirkungskette erklärbar sind - zum anderen, kann die Wahrscheinlichkeit $P_{nmo,i}$, dass ein Bauproduktionsfaktor (oder eine Arbeitsstation) seine Arbeiten ungehindert durchführen kann, real nur gesteigert werden, d.h. absolute Sicherheit ist unerreichbar. Eine Steigerung von $P_{nmo,i}$ führt zum einen zu einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit $P_{TC_{nmo,i}}$ ³²¹, dass i sich zur Engpassressource entwickelt (angenommen wird hierbei, dass i in der Planung so ausgelegt wurde, dass die Dimensionierung ausreichend ist). Zum anderen führt eine Steigerung von $P_{nmo,i}$ insbesondere zu einer Steigerung der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit und einer Verringerung der Schwankungen der Leistungsfähigkeit von i innerhalb eines bestimmten Zeithorizonts³²². Die Auswirkungen einer Steigerung der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit und einer Verringerung der Schwankungen der Leistungsfähigkeit werden im Folgenden genauer analysiert.

Ergänzend zu Kapitel 3 gilt, dass die Leistungsfähigkeit eines Bauproduktionsfaktors $LF_{nmo,i}$ bzw. einer Gruppe von identischen Bauproduktionsfaktoren $LF_{nmo,l_x}(t_y)$ Zufallszahlen sind. Aus Gleichung 3.33 und Formel 3.34 (vgl. Kapitel 3) folgt, dass aus einer Verringerung der Leistungsschwankungen der einzelnen an einer Arbeitsstation o tätigen Bauproduktionsfaktoren eine Verringerung der Leistungsschwankungen der Arbeitsstation resultiert. Auch hier ist der starke Einfluss von Engpassressourcen erkennbar. Des Weiteren ist logisch nachvollziehbar, dass je mehr nicht redundante Bauproduktionsfaktoren an einer Arbeitsstation beteiligt sind, desto geringer ist der Erwartungswert der Leistungsfähigkeit³²³.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Leistungsfähigkeit der Arbeitsstation kleiner als ein fiktiver Grenzwert ist, ist gegebene durch:

$$P(LF_{nmo} \leq \overline{LF_{nmo}}) = 1 - P(LF_{nmo} > \overline{LF_{nmo}}) \quad (5.59)$$

$P(LF_{nmo} < \overline{LF_{nmo}})$ Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Leistungsfähigkeit von LF_{nmo} an Arbeitsstation nmo , die kleiner als $\overline{LF_{nmo}}$ ist

³²¹ Eine Behinderung des Produktionsfaktors i führt nicht automatisch dazu, dass dieser eine Engpassressource ist, da alle weiteren Produktionsfaktoren stärker in ihrer Leistungsfähigkeit behindert sein können. Die Wahrscheinlichkeit der Behinderung sagt des Weiteren nichts über den Grad der Behinderung aus.

³²² Die erreichte durchschnittliche Leistungsfähigkeit eines Bauproduktionsfaktors kann dadurch gesteigert werden, dass in der Planung und Steuerung Maßnahmen identifiziert werden, die dazu führen, dass sich die Arbeitsbedingungen für den Bauproduktionsfaktor verbessern. Eine Verringerung der Leistungsschwankungen folgt insbesondere aus gleichbleibenden Produktionsbedingungen.

³²³ Als gedankliches Experiment kann man sich eine Arbeitsstation mit unendlich vielen $LF_{nmo,l_x}(t_y)$ mit identischen Normalverteilungen vorstellen. Der Erwartungswert einer solchen Arbeitsstation nähert sich dem niedrigsten Wert der unterstellten Normalverteilung an, da die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Wert in einem Zufallsexperiment gezogen wird, mit steigender Anzahl der Zufallszahlen steigt (siehe hierzu weiter unten).

$P(LF_{nmo} \geq \overline{LF_{nmo}})$	Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Leistungsfähigkeit von LF_{nmo} an Arbeitsstation nmo , die größer als $\overline{LF_{nmo}}$ ist
$\overline{LF_{nmo}}$	Fiktiver Grenzwert der Leistungsfähigkeit

Wobei Arbeitsstation nmo aufgrund der in Gleichung 3.33 dargestellten geltenden Zusammenhänge eine höhere Leistungsfähigkeit als $\overline{LF_{nmo}}$ nur erreicht werden kann, wenn alle I_x eine höher Leistungsfähigkeit als $\overline{LF_{nmo}}$ besitzen. Unterstellt man für alle beteiligten Bauproduktionsfaktoren eine direkte Abhängigkeit (d.h. keine Pufferung), dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Leistungsfähigkeit der Arbeitsstation größer als ein fiktiver Grenzwert ist, gegebene durch³²⁴:

$$P(LF_{nmo} > \overline{LF_{nmo}}) = \prod_{I_x=1}^{n_{I_x}} (1 - F_{I_x}(\overline{LF_{nmo}})) \quad (5.60)$$

$F_{I_x}(\overline{LF_{nmo}})$	Wert der Kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion der Leistungsfähigkeit von I_x innerhalb der Arbeitsstation nmo für $\overline{LF_{nmo}}$
n_{I_x}	Anzahl der Bauproduktionsfaktorgruppen, die an Arbeitsstation nmo beteiligt sind

Hieraus folgt:

$$P(LF_{nmo} \leq \overline{LF_{nmo}}) = 1 - \prod_{I_x=1}^{n_{I_x}} (1 - F_{I_x}(\overline{LF_{nmo}})) \quad (5.61)$$

Aus den in Formel 5.61 dargestellten Zusammenhängen folgt, dass mit steigenden Anzahl n_{I_x} der Erwartungswert der Leistungsfähigkeit der Arbeitsstationen sich dem Minimalwert von $F_{I_x}(LF_{nmo})$ annähert (diese Aussage gilt unter der zusätzlichen Annahme ähnlicher kumulativer Wahrscheinlichkeitsverteilungen $F_{I_x}(LF_{nmo})$).

Unter den Annahmen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_{I_x}(LF_{nmo})$ einer Normalverteilung entspricht und der Erwartungswert dieser Normalverteilung für alle I_x identisch ist, kann der Einfluss der Varianz der Leistungsfähigkeiten analysiert werden.

Für Normalverteilungen gilt generell:

$$P(x \leq \bar{x}) = F(\bar{x}) = \Phi(z) \quad (5.62)$$

mit

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma} \quad (5.63)$$

³²⁴ An dieser Stelle könnte der Leser sich fragen, warum der Umweg über die Gegenwahrscheinlichkeit eingeschlagen wird. Der Grund hierfür ist, dass die Berechnung bedeutend einfacher als der direkte Weg der Berechnung ist. Ursache hierfür ist wiederum, dass die „Kombinationsmöglichkeiten“ für die Gegenwahrscheinlichkeit genau einer einzigen Kombination entsprechen.

$P(x \leq \bar{x})$	Wahrscheinlichkeit, dass die normalverteilte Zufallszahl x kleiner als $\bar{x}$ ist
$F(\bar{x})$	Wert der Kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion für den Wert $\bar{x}$
$\Phi(z)$	Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung für den Wert z
μ	Mittelwert der Zufallszahl x
σ	Standardabweichung der Zufallszahl x

Für alle z -Werte können die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten aus der Tabelle der Standardnormalverteilung abgelesen werden.

Des Weiteren gilt der Zusammenhang:

$$\Phi(z) \text{ ist monoton steigend für positive } z - \text{Werte} \quad (5.64)$$

und

$$\Phi(-z) = 1 - \Phi(z) \quad (5.65)$$

Aus dem Vergleich zweier kumulativer Verteilungsfunktionen $F_1(x)$ und $F_2(x)$ mit $\sigma_1 > \sigma_2$ und $\mu_1 = \mu_2$ folgt für $\bar{x} < \mu$:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma} \rightarrow \left| \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma_1} \right| < \left| \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma_2} \right| \text{ bzw. } |z_1| < |z_2|^{325} \quad (5.66)$$

Da $\Phi(z)$ monoton steigend ist, gilt für den Fall, dass $\bar{x}$ kleiner als der Erwartungswert μ ist (vgl. Formel 5.65):

$$\Phi(-z_1) > \Phi(-z_2) \quad (5.67)$$

Hieraus folgt:

$$P(x_1 \leq \bar{x}) > P(x_2 \leq \bar{x}) \text{ für } \bar{x} < \mu \text{ und } \sigma_1 > \sigma_2 \quad (5.68)$$

D.h. die Wahrscheinlichkeit, dass ein niedrigerer Wert als der Grenzwert $\bar{x}$ auftritt, ist bei größeren Varianzen (bzw. Standardabweichungen) größer, als bei kleinen - für $\bar{x} < \mu$. Somit gilt, dass $P(LF_{nmo} < \overline{LF_{nmo}})$ für größere Varianzen (bzw. Standardabweichungen) größer ausfällt³²⁶.

Aus Gleichung 5.68 folgt im Zusammenhang mit Formel 5.59, dass $P(LF_{nmo} > \overline{LF_{nmo}})$ für Werte $\overline{LF_{nmo}} < \text{Erwartungswert}(LF_{nmo_{I_x}})$ umso geringer ausfällt, je größer die Varianzen (bzw. Standardabweichungen) der Werte $LF_{nmo_{I_x}}$ sind.

Umgekehrt gilt aber auch, dass $P(LF_{nmo} \leq \overline{LF_{nmo}})$ für Grenzwerte $\overline{LF_{nmo}} > \text{Erwartungswert}(LF_{nmo_{I_x}})$ niedriger bei großen Varianzen ausfällt, da gilt:

³²⁵ z_1 und z_2 sind negativ da $\bar{x} < \mu$.

³²⁶ Diese Aussage wurde unter der obigen Annahme getroffen, dass es sich um normalverteilte $LF_{nmo_{I_x}}$ mit identischem Erwartungswert handelt. Es handelt sich hierbei allerdings um eine qualitative Aussage, die auch auf $LF_{nmo_{I_x}}$ mit unterschiedlichen Erwartungswerten zutrifft (insbesondere allerdings, wenn diese nahe beieinander liegen).

$$P(x_1 \leq x) < P(x_2 \leq x) \text{ für } x > \mu \text{ und } \sigma_1 > \sigma_2 \quad (5.69)$$

Aus Formel 5.60 ist jedoch leicht nachvollziehbar, dass die Wahrscheinlichkeit $P(LF_{nmo} > \overline{LF_{nmo}})$ mit einer steigenden Anzahl an Bauproduktionsfaktorgruppen n_{I_x} deutlich abnimmt, wohingegen die Wahrscheinlichkeit, dass $P(LF_{nmo} \leq \overline{LF_{nmo}})$ deutlich zunimmt (insbesondere bei hohen Varianzen). Dies liegt erneut an der Tatsache, dass der Leistungsengpass die Gesamtleistung dominiert.

Aus den dargestellten Zusammenhängen wird deutlich, welchen Einfluss der Parameter Varianz auf die Entwicklung der Leistungsfähigkeit hat. Eines der Hauptziele des LPS und Lean Management im Bauwesen ist aus diesen Gründen die Reduktion der Varianz.

Neben der Reduktion der Varianz hat das LPS insbesondere die Steigerung des Erwartungswerts der Leistungsfähigkeit zum Ziel. Unterstellt man bei diesem Vorgehen, dass die Entwicklung der Varianz (bzw. Standardabweichung) unabhängig von der Entwicklung des Erwartungswerts ist, so entspricht diese Maßnahme einer Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen entlang der x-Achse. Aus Formel 5.62 und 5.63 folgt eine Reduktion von $P(LF_{nmo} \leq \overline{LF_{nmo}})$ bzw. eine Steigerung von $P(LF_{nmo} > \overline{LF_{nmo}})$.

Der Effekt des LPS ist qualitativ in Abbildung 5-14 dargestellt. Die roten Linien deuten die Steigerung des Erwartungswerts $\Delta\mu$ der Leistungsfähigkeit an. Die gleichzeitige Verringerung der Standardabweichung $\Delta\sigma$ ist anhand der geringeren Streuweite der Werte der Leistungsfähigkeit um den Erwartungswert zu erkennen. Für Abbildung 5-14 wurde angenommen, dass durch das LPS eine Steigerung des Erwartungswerts der Leistung um 20% und eine gleichzeitige Reduktion der Standardabweichung um 50% erreicht werden kann (jeweils bezogen auf $f(LF_{nmo, I_x})$). Des Weiteren handelt es sich hierbei um ein fiktives Beispiel mit $n_{I_x} = 5$. Die sich ergebende Gesamtverteilung macht deutlich, wie stark die Auswirkungen einer Reduktion dieser Eingangsparameter sind.

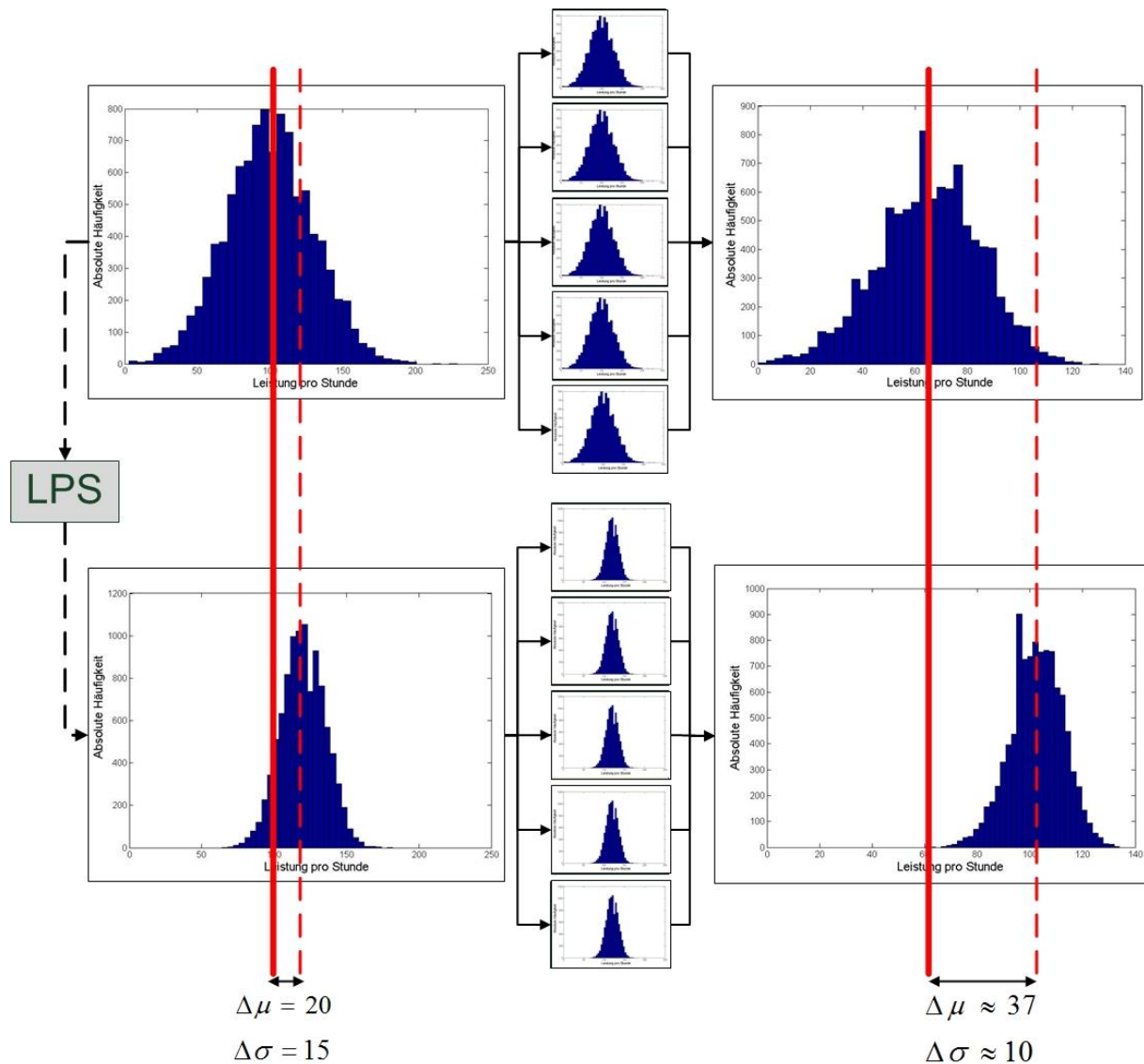


Abbildung 5-14: Wirkungsmechanismus des Last Planner Systems³²⁷

Das LPS führt somit zu einer Steigerung des Erwartungswerts und einer Reduktion der Standardabweichungen durch die systematische Eliminierung von Verschwendungselementen innerhalb der Prozesse (vgl. Kapitel 2.2.2 und 5.1.1). Unterstützt wird diese Feststellung von Ballard und Howell, die den Kern des LPS-Systems in der Steigerung der Prozesszuverlässigkeiten sehen (vgl. (Ballard 2000c) (Ballard & Howell 2003) und Abbildung 5-14)³²⁸.

Die dargestellten Zusammenhänge beziehen sich auf eine Arbeitsstation (Prozesssichtweise). Wird nun die Prozesssichtweise um die Flusssichtweise (vgl. Kapitel 2.2.1) erweitert (d.h. mehrere sequenziell ablaufende Arbeitsstationen), gelten ähnliche Zusammenhänge. Die Analyse der Flusssichtweise findet in Kapitel 5.3 statt.

³²⁷ Diese Darstellung ist das Ergebnis von mehreren Simulationsdurchläufen. Unterstellt wurde, dass alle Bauproduktionsfaktoren die identische Funktion $f_{I_x}(LF_{nmoI_x})$ aufweisen. Es handelt sich hierbei um eine prinzipielle Darstellung, d.h. es handelt sich nicht um Realdaten, sondern um angenommene Verteilungen.

³²⁸ Ballard schreibt hierzu: "Consequently, it is appropriate to focus the research question on improving work flow reliability, with confidence that improving reliability is beneficial to project performance."(Ballard 2000c)

5.3 Flussoptimierung³²⁹

Die Verteilung der Leistungsfähigkeit einer Arbeitsstation $f(LF_{nmo})$ hängt von den in Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 erläuterten Zusammenhängen ab. Die Leistungsfähigkeit eines Produktionssubprozesses hängt sowohl von der Leistungsfähigkeit der einzelnen beteiligten Arbeitsstationen (die mit $f(LF_{nmo})$ dargestellt werden können), als auch von der Art der Gestaltung der Kopplungen zwischen den Arbeitsstationen ab (d.h. insbesondere wie groß der Puffer zwischen den einzelnen Arbeitsstationen ausgelegt wird und welche Steuerung bei der Kopplung der Prozesse umgesetzt wird).

Die Varianz und der Erwartungswert der Dauer eines Produktionsprozesses hängen insbesondere von der Menge der mit einem Prozessdurchlauf zu produzierenden Produkte ab (d.h. von der gewählten Losgröße – vgl. Kapitel 2.3). Aufgrund der in der Bauproduktion vorhandenen Flexibilität³³⁰, können nahezu beliebige Losgrößen produziert werden. Die „optimale“ Losgröße wird insbesondere dadurch bestimmt, dass:

- sich einzelne Bauproduktionsfaktoren bei der Produktion nicht zu stark gegenseitig behindern (z.B. bei Bauarbeitern und Baumaschinen),
- nicht überproportional viele Manövrierbewegungen beim Einsatz von Baumaschinen notwendig sind³³¹ und
- nicht überproportional viele zusätzliche Schnittstellen bei Bauteilen entstehen (z.B. beim Dammbau oder bei Stahlbetonarbeiten).

Insbesondere bei den ersten beiden Punkten ist zu erkennen, dass durch den Einsatz von wenigen (im Fall von Personen und Baumaschinen) und bzgl. ihrer Dimension kleinen (im Fall von Baumaschinen) Bauproduktionsfaktoren kleinere „optimale“ Losgrößen realisiert werden können.

Aus theoretischer Sichtweise existieren zwischen der Wahl der Losgröße und der damit verbundenen, notwendigen Prozessdauer von Bauproduktionsfaktoren folgende Zusammenhänge:

- unabhängig
- degressiv
- progressiv
- linear

In Abbildung 5-15 sind die einzelnen Möglichkeiten dargestellt. Es handelt sich bei den dargestellten Zusammenhängen um den funktionalen Zusammenhang zwischen Losgröße und Erwartungswerts der Prozessdauer. Identische Zusammenhänge existieren für den funktionalen Zusammenhang zwischen der Losgröße und Varianz der Prozessdauer.

Aufgrund des bestehenden Zusammenhangs zwischen Prozessdauern und Leistungsfähigkeit, können ähnliche Verteilungen für die Leistungsfähigkeit aufgestellt werden.³³²

³²⁹ Im Folgenden werden ausschließlich Fälle mit reinem sequenziellem Ablauf diskutiert, d.h. die Produktionsprozesse haben keine Schleifen. Die qualitativen Aussagen treffen allerdings auch für Schleifen zu.

³³⁰ Diese Flexibilität resultiert insbesondere daher, dass die Bauproduktionsfaktoren meist nicht ortsgebunden sind. Anders als in der stationären Industrie, in der Maschinen und Arbeitsplätze zumindest mittelfristig ortsgebunden sind (die Produktion findet in einer Produktionshalle mit fester Aufteilung statt), kann im Bauwesen innerhalb einer Produktion nahezu beliebig das „Fabriklayout“ verändert werden.

³³¹ Hierbei gilt, je größer eine Baumaschine desto größer ist die „optimale“ Losgröße.

³³² Im Anhang 2 wird der Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Leistung ausführlicher dargestellt.

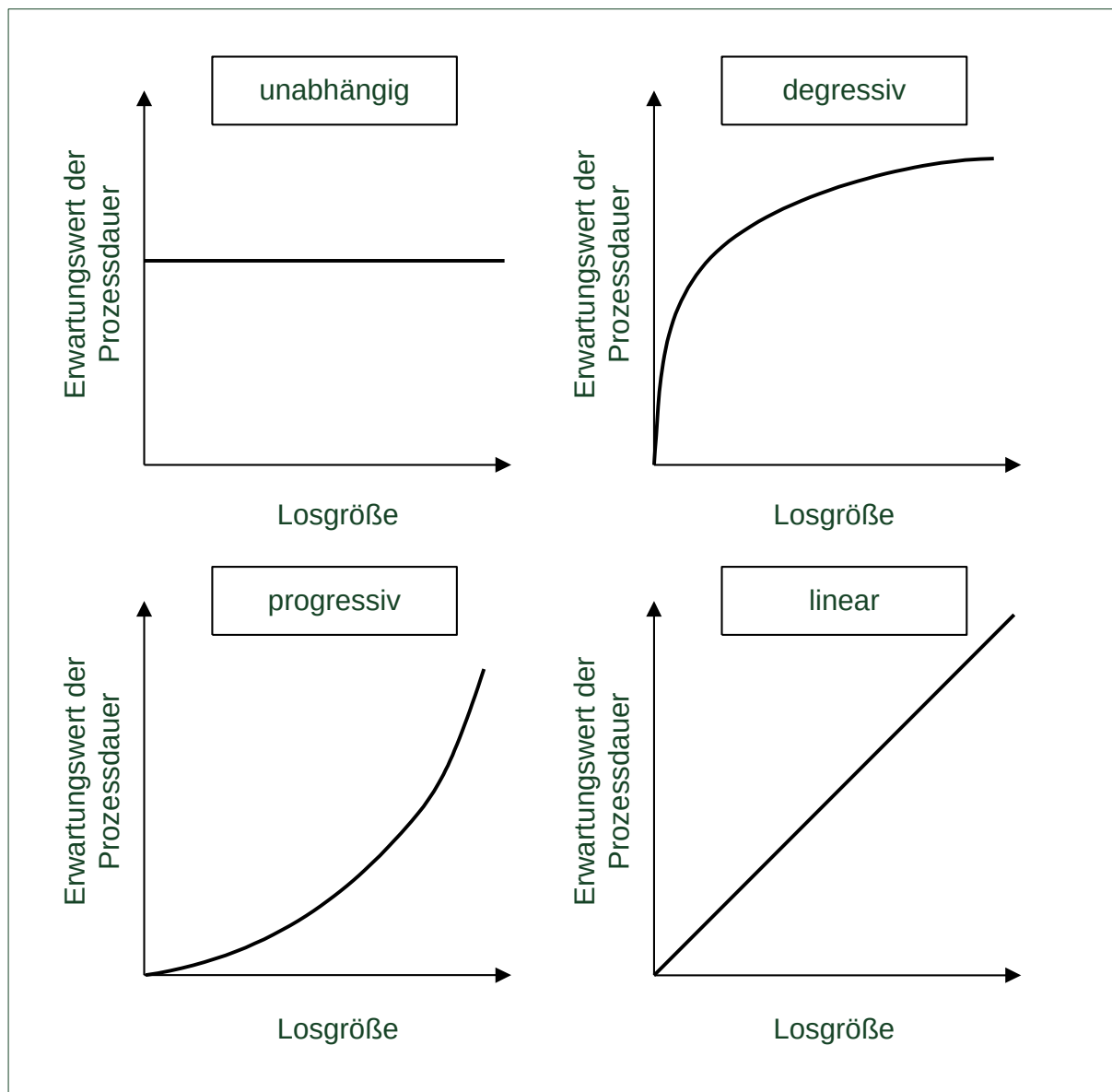


Abbildung 5-15: Arten des funktionalen Zusammenhangs zwischen Losgröße und Erwartungswert der Prozessdauer

In der Praxis treten die einzelnen Formen bezogen auf einen bestimmten Sachverhalt jedoch auch gemeinsam auf, so dass Mischformen entstehen können.

Generell gilt, dass insbesondere durch den Einsatz zusätzlicher Bauproduktionsfaktoren der Erwartungswert der Prozessdauern gesenkt werden kann (hierbei sind die obigen Zusammenhänge bzgl. der „optimalen“ Losgröße zu beachten).

Weitere Möglichkeiten den Erwartungswert, zu beeinflussen sind insbesondere:

- Der Einsatz längerer Arbeitszeiten³³³
- Die Reduktion von Rüstzeiten
- Die Reduktion von Ausfällen

³³³ Hierdurch kann die Arbeitszeit zwar nicht verringert werden, jedoch kann der Fertigstellungstermin bzgl. seines Erwartungswerts verringert werden. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass der Fertigstellungstermin und Arbeitsbeginn des Folgeprozesses auf unterschiedliche Zeitpunkte (z.B. Kalendertage) fallen.

- Die Reduktion von unnötigen Prozessschritten
- Die Reduktion von Qualitätsmängeln

Zur Reduktion der Varianz sind grundsätzlich die identischen Maßnahmen wie zur Reduktion des Erwartungswerts geeignet.

Da der unabhängige Zusammenhang als eine seltene Sonderform angesehen werden kann und in vielen Bereichen der degressive und progressive Zusammenhang durch den linearen Zusammenhang approximiert werden kann, wird dieser im Folgenden genauer analysiert.

Für einen bestimmten Losgrößengrößenintervall gilt somit³³⁴:

$$\mu_{\text{Losgröße}} \cong P_{\text{Losgröße}} \times \mu_{\text{Einzelprodukt}} \quad (5.70)$$

$$\sigma_{\text{Losgröße}}^2 \cong P_{\text{Losgröße}} \times \sigma_{\text{Einzelprodukt}}^2 \quad (5.71)$$

$\mu_{\text{Losgröße}}$	<i>Erwartungswert der Prozessdauer für eine bestimmte Losgröße</i>
$P_{\text{Losgröße}}$	<i>Produzierte Losgröße</i>
$\mu_{\text{Einzelprodukt}}$	<i>Erwartungswert der Prozessdauer bei Losgröße 1</i>
$\sigma_{\text{Losgröße}}^2$	<i>Varianz der Prozessdauern für eine bestimmte Losgröße</i>
$\sigma_{\text{Einzelprodukt}}^2$	<i>Varianz der Prozessdauer bei Losgröße 1</i>

D.h. je größer die Losgröße, desto größer der Erwartungswert und die Varianz der Prozessdauern.

Das Verhältnis von Produktionsmenge zu Losgröße bestimmt die Anzahl der zur Fertigstellung notwendigen Durchläufe der Produktionsprozesse.

$$c_L = \frac{P_{\text{Menge}}}{P_{\text{Losgröße}}} \quad (5.72)$$

c_L	<i>Anzahl der notwendigen Durchläufe der Produktionsprozesse</i>
P_{Menge}	<i>Zu produzierende Gesamtmenge</i>

Eine gute Produktion zeichnet sich generell insbesondere durch folgende Punkte aus³³⁵:

- hohe Auslastung
- hohe Planbarkeit, d.h. geringe Varianzen
- geringe Durchlaufzeit
- hohe Qualität

³³⁴ Damit Formel 5.71 gültig ist, müssen die einzelnen Losgrößen des Weiteren unabhängig voneinander sein.

³³⁵ Kosten sind in dem hier dargestellten Zusammenhang keine wirklichen Zielgrößen, sondern das Ergebnis der aufgelisteten Zielgrößen. Kosten können nicht gesteuert werden, da sie eine Output-Größe darstellen. Entscheidungen bzgl. der obigen Punkte beeinflussen jedoch die Kostenentwicklung.

z.B.: Bedeutet eine geringe Durchlaufzeit - bei ansonsten identischen Bedingungen - gleichzeitig einen hohen Kapitalumschlag und ein hoher Kapitalumschlag eine höhere Rendite.

Eine wesentliche Möglichkeit der Produktionsgestaltung ist die Wahl des Kopplungsmechanismus zwischen den einzelnen Produktionsprozessen. Im Folgenden werden mehrere unterschiedliche Varianten der Kopplung diskutiert und deren Vor- und Nachteile erläutert. Grundsätzlich gibt es insbesondere folgende Kopplungsmöglichkeiten³³⁶:

Variante 1: Der Produktionssubprozess n fängt erst an, wenn $n-1$ bereits sicher abgeschlossen ist.

Variante 2: Der Produktionsprozess n fängt an, sobald $n-1$ fertiggestellt wurde.

Variante 3: Analog zu Variante 1 nur mit kleineren Produktionslosgrößen.

Variante 4: Analog zu Variante 2 mit kleineren Produktionslosgrößen.

Variante 5: Analog zu Variante 4 mit maximalem erlaubten Puffer zwischen den Produktionsprozessen n und $n-1$.

Variante 6: Analog zu Variante 4. Die maximal im System befindlichen Zwischenprodukte werden beschränkt. Produktionsprozess 1 fängt erst bei Unterschreitung des dafür vorgesehen Grenzwerts die Produktion an.

Im Folgenden wird genauer auf die einzelnen Varianten eingegangen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Dauer von Produktionsprozessen unabhängig von der Art und Weise der Kopplung ist³³⁷. Bei einer Verringerung der Produktionslosgröße wird davon ausgegangen, dass die Entwicklung der Erwartungswerte und der Standardabweichungen sich gemäß Formel 5.70 und 5.71 verhalten.³³⁸

Variante 1 entspricht der einfachsten Kopplungsmöglichkeit, die einzelnen Produktionsprozesse bearbeiten den gesamten Produktionsauftrag auf einmal, d.h. der c_L -Wert ist 1. Produktionsprozess n beginnt erst, wenn $n-1$ sicher abgeschlossen ist, d.h. die längstmögliche Prozessdauer vergangen ist. Der qualitative Ablauf von Variante 1 ist in Abbildung 5-16 dargestellt. Die Uhren sollen verdeutlichen, dass es sich bei dem Puffer letztlich um eine zeitliche Entkopplung handelt.

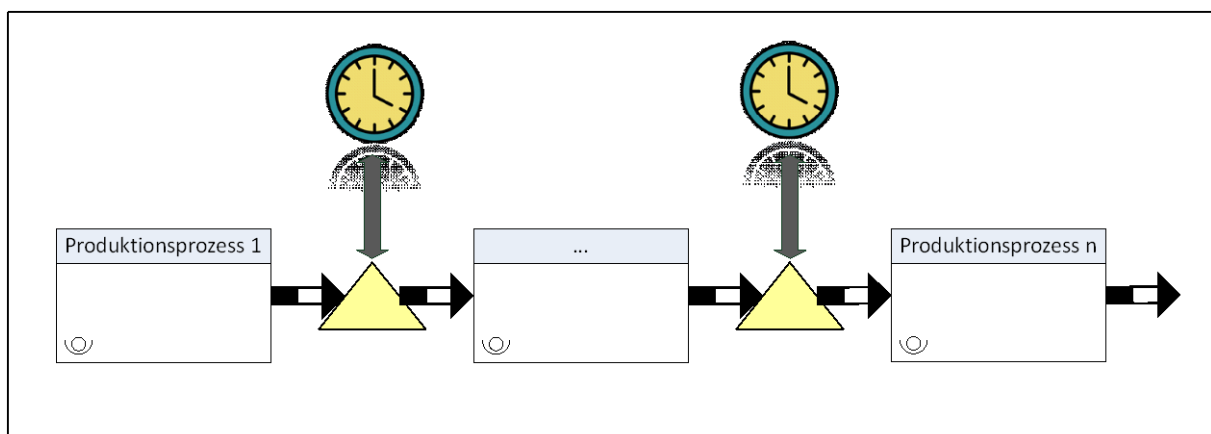


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung Variante 1

Variante 1 hat den Vorteil, dass alle Produktionsprozesse ungestört voneinander arbeiten können. Der wesentliche Nachteil ist jedoch, dass der Vorgängerprozess alle Arbeiten komplett abgeschlossen haben muss, bevor der Nachfolgerprozess starten kann. Aus diesem Grund besitzt Variante 1 sowohl den

³³⁶ Für den weiteren Verlauf wird unterstellt, dass es sich um unabhängige und normalverteilte Prozessdauern handelt.

³³⁷ Identisches gilt somit für die Leistungsfähigkeit.

³³⁸ Die Verifikation der in diesem Kapitel verwendeten Simulationen wird in Anhang 14 thematisiert.

größten Wert für die spätestmögliche Fertigstellung t_{sf} als auch den größten Erwartungswert für den Fertigstellungszeitpunkt. In Abbildung 5-17 sind die Ergebnisse einer exemplarischen Produktion dargestellt.

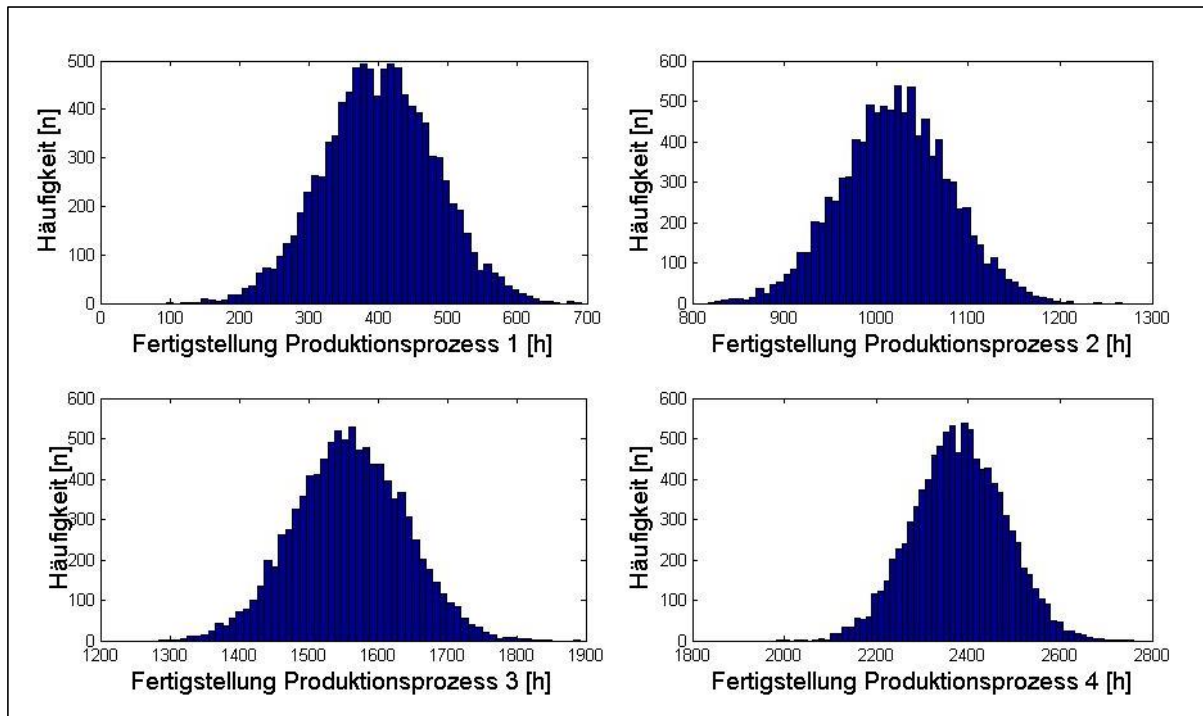


Abbildung 5-17: Exemplarische Darstellung von Variante 1³³⁹

Für Variante 1 gilt aufgrund der Kopplungsbeziehungen und der Formeln 5.70 und 5.71:

$$\mu_{ges} \cong \mu_{\bar{n}_p} + \sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p-1} \mu_{n_p} + 4 \times \sigma_{n_p} \quad (5.73)$$

μ_{ges} Erwartungswert des Fertigstellungszeitpunkts
 $\mu_{\bar{n}_p}$ Erwartungswert der Dauer des letzten Produktionsprozesses
 μ_{n_p} Erwartungswert des Fertigstellungszeitpunkts des Produktionsprozesses n_p ,
 $n_p = 1, \dots, \bar{n}_p$
 $\sigma_{n_p}^2$ Varianz der Dauer von Prozess n_p

$$\sigma_{ges}^2 = \sigma_{\bar{n}_p}^2 \quad (5.74)$$

σ_{ges}^2 Varianz der Dauer des Fertigstellungszeitpunkts
 $\sigma_{\bar{n}_p}^2$ Varianz der Dauer des letzten Produktionsprozesses

$$\sigma_{n_p}^2 = P_{Losgröße} \times \sigma_{Einzelprodukt_{n_p}}^2 \quad (5.75)$$

$\sigma_{Einzelprodukt_{n_p}}^2$ Varianz der Dauer des Produktionsprozesses n_p bei Losgröße 1

³³⁹ Dies ist das Ergebnis mehrerer Simulationsdurchläufe, der in MATLAB programmierte Code ist in Anhang 3 beigefügt. In diesem Beispiel startet z.B. Produktionsprozess 2 „unabhängig“ von der Fertigstellung von Produktionsprozess 1 bei 700 [h].

³⁴⁰ Der Faktor „4“ repräsentiert letztlich die akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit bzgl. der Prozessdauern der einzelnen Produktionsprozesse und kann auch durch andere Werte ersetzt werden.

$$t_{sf} \cong \mu_{ges} + 4 \times \sigma_{ges} \quad (5.76)$$

t_{sf} Spätester möglicher Fertigstellungszeitpunkt

Variante 2 ist dadurch gekennzeichnet, dass der nachfolgende Produktionsprozess n direkt im Anschluss an die Fertigstellung des vorhergehenden Produktionsprozess n-1 mit seiner Tätigkeit beginnt. Der Ablauf von Variante 2 ist in Abbildung 5-18 qualitativ dargestellt.

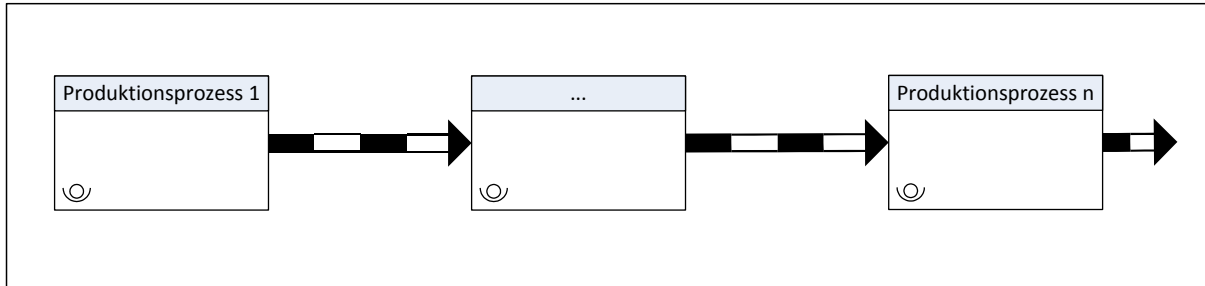


Abbildung 5-18: Schematische Darstellung Variante 2

Dieses Vorgehen setzt voraus, dass der jeweilige Produktionsprozess n bzgl. des Produktionsbeginns sehr flexibel ist und immer direkt nach Abschluss des Produktionsprozesses n-1 beginnen kann. Der Erwartungswert der Fertigstellung von Variante 2 ist deutlich geringer als derjenige von Variante 1. Die wesentlichen Nachteile dieser Variante sind, dass ein Vorgängerprozess alle Arbeiten komplett abgeschlossen haben muss - analog zu Variante 1 - damit der Nachfolgerprozess beginnen kann, und dass die Varianz des Fertigstellungstermins sehr stark zunimmt. Da der Produktionsprozess n direkt nach Beendigung von Produktionsprozess n-1 startet, kann dieser des Weiteren - trotz der teilweise hohen Wartezeiten - keine Nebentätigkeiten aufnehmen. Die dargestellten Verteilungen entsprechen den kumulierten Produktionszeiten³⁴¹. Variante 2 hat ebenfalls den c_L -Wert 1.

³⁴¹ D.h. im Fall von Prozess 1 sind Variante 1 und 2 identisch. Im Fall von Prozess 2 ist die kumulierte Prozessdauer von Prozess 1 und 2 dargestellt, entsprechend gilt für Prozess 3, dass die kumulierte Prozessdauer von Prozess 1,2 und 3 dargestellt ist usw..

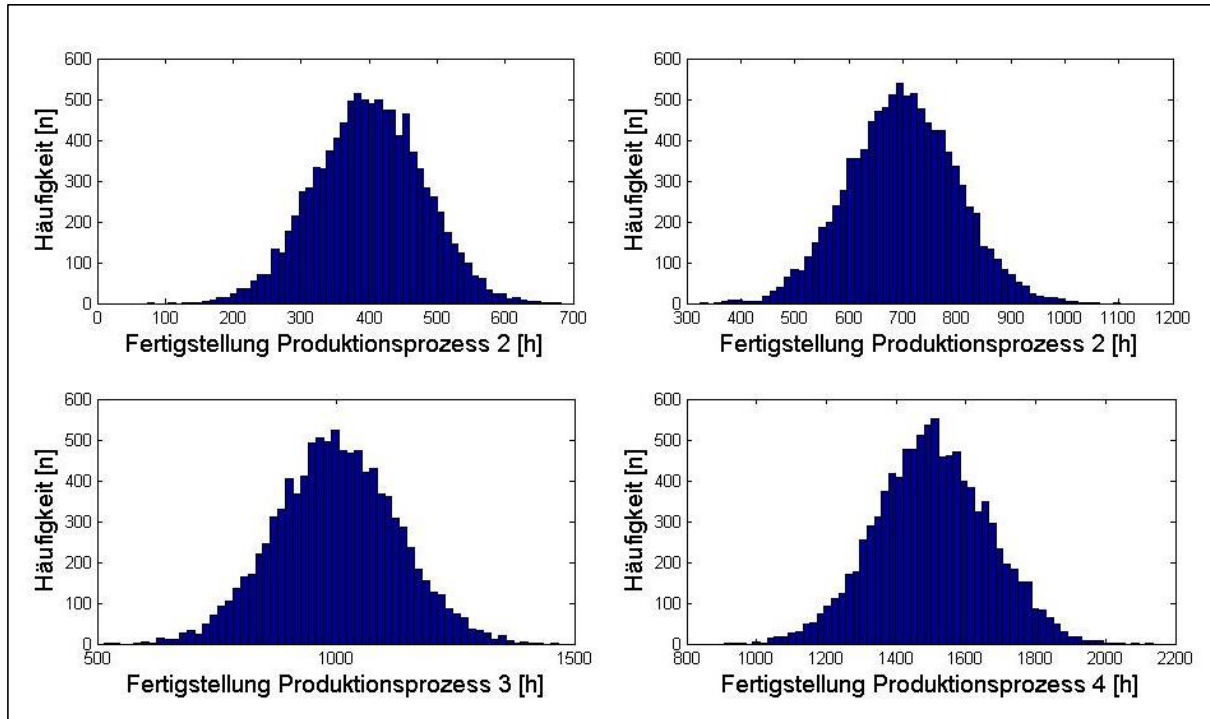


Abbildung 5-19: Exemplarische Darstellung von Variante 2³⁴²

Für Variante 2 gilt:

$$\mu_{\text{ges}} = \sum_{n_p=1}^{\overline{n_p}} \mu_{n_p} \quad (5.77)$$

$$\sigma_{\text{ges}}^2 = \sum_{n_p=1}^{\overline{n_p}} \sigma_{n_p}^2 \quad (5.78)$$

$$t_{\text{sf}} \cong \mu_{\text{ges}} + 4 \times \sigma_{\text{ges}} \quad (5.79)$$

Der Vergleich zwischen Variante 1 und 2 macht deutlich, dass Variante 1 einen höheren μ_{ges} -Wert besitzt (vgl. Formel 5.73 und 5.77). Umgekehrt besitzt Variante 1 eine niedrigeren σ_{ges}^2 -Wert (vgl. Formel 5.74 und 5.78). Der direkte Vergleich der t_{sf} -Werte von Variante 1 und 2 verdeutlicht, dass Variante 1 einen höheren t_{sf} -Werte besitzt (vgl. Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19).

Vergleich der t_{sf} -Werte³⁴³:

$$t_{\text{sf_Variante1}} > t_{\text{sf_Variante2}}$$

³⁴² Dies ist das Ergebnis mehrerer Simulationsdurchläufe, der in MATLAB programmierte Code ist in Anhang 4 beigefügt.

³⁴³ Der Fall $\sigma_{n_p} \leq 1$, wird hier nicht berücksichtigt, da eine solch niedrige Standardabweichung sehr unrealistisch ist.

$$\sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p} \mu_{n_p} + 4 \times \sigma_{n_p} > 4 \times \sqrt{\sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p} \sigma_{n_p}^2} + \sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p} \mu_{n_p}$$

$$\sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p} \sigma_{n_p} > \sqrt{\sum_{n_p=1}^{\bar{n}_p} \sigma_{n_p}^2}$$

Variante 3 entspricht Variante 1 mit der Ausnahme, dass die Produktionslosgröße verringert wird. Die in Abbildung 5-20 dargestellten Simulationsergebnisse für Variante 3 haben den exemplarischen c_L -Wert 3. Die Produktionsprozesse starten nach dem sicheren Abschluss des Vorgängerprozesses. Da aufgrund der Losgrößenreduktion mehrere Losgrößen produziert werden müssen, gilt des Weiteren, dass ein Produktionsprozess erst nach dem sicheren Abschluss einer Losgröße eine neue Losgröße bearbeiten kann.

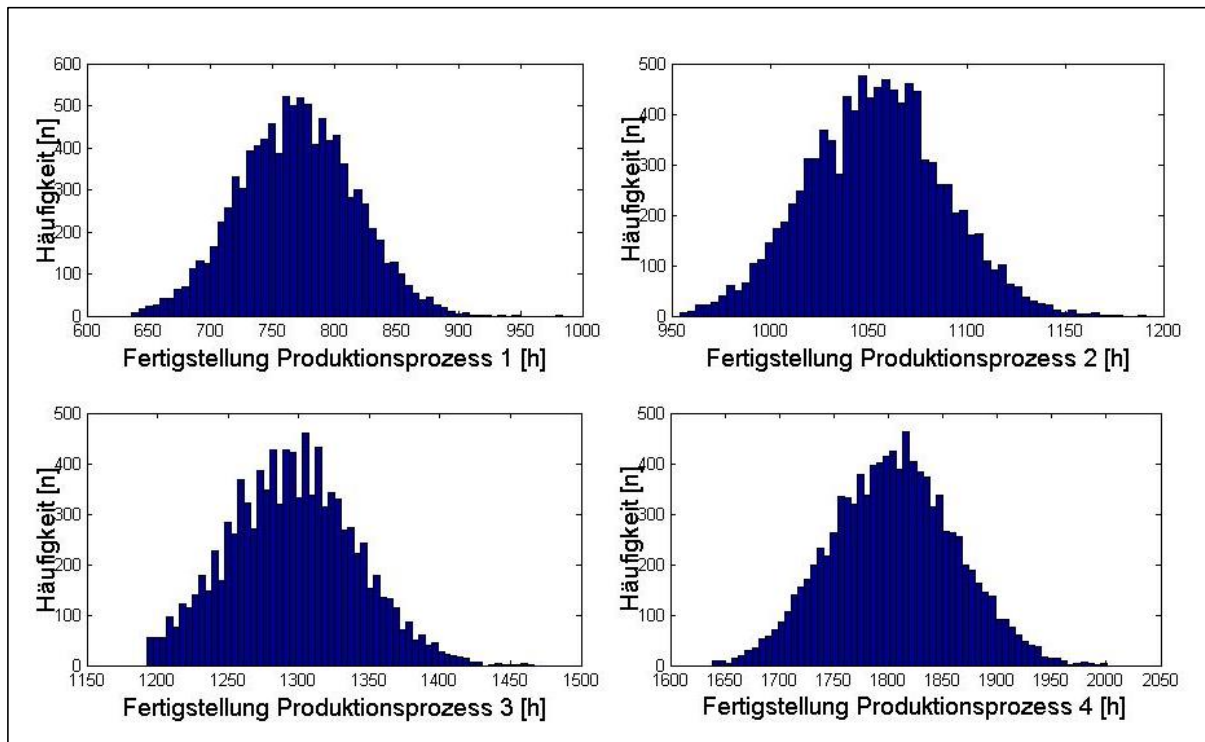


Abbildung 5-20: Exemplarische Darstellung von Variante 3³⁴⁴

Aufgrund der bestehenden Zusammenhänge gilt (vgl. Formel 5.70 und 5.71):

$$\mu_{n_p-c_L} = \frac{\mu_{n_p-V1}}{c_L} \quad (5.80)$$

$\mu_{n_p-c_L}$ Erwartungswert der Prozessdauer von Produktionsprozess n_p bei Losgröße c_L
 μ_{n_p-V1} Erwartungswert der Prozessdauer von Produktionsprozess n_p bei Variante 1 ($c_L = 1$)

³⁴⁴ Dies ist das Ergebnis mehrerer Simulationsdurchläufe, der in MATLAB programmierte Code ist in Anhang 5 beigefügt.

$$\sigma_{n_p-c_L} = \frac{\sigma_{n_p-V1}}{\sqrt{c_L}} \quad (5.81)$$

$\sigma_{n_p-c_L}$ *Varianz der Prozessdauer des Produktionsprozesses n_p bei Losgröße c_L*
 σ_{n_p-V1} *Varianz der Prozessdauer des Produktionsprozesses n_p bei Variante 1 ($c_L = 1$)*

$$\begin{aligned} \mu_{ges-c_L} &\cong (c_L - 1) \\ &\times \max \left[\mu_{1-c_L} + 4 \times \sigma_{1-c_L}, \dots, \mu_{\overline{n_p}-c_L} + 4 \right. \\ &\quad \left. \times \sigma_{\overline{n_p}-c_L} \right] + \mu_{\overline{n_p}-c_L} + \sum_{n_p=1}^{\overline{n_p}-1} \mu_{n_p-c_L} + 4 \times \sigma_{n_p-c_L} \end{aligned} \quad (5.82)$$

μ_{ges-c_L} *Erwartungswert der Dauer des Fertigstellungszeitpunkts bei Losgröße c_L*
 $\mu_{\overline{n_p}-c_L}$ *Erwartungswert der Dauer des letzten Produktionsprozesses bei Losgröße c_L*
 $\mu_{n_p-c_L}$ *Erwartungswert der Dauer von Prozess n_p bei Losgröße c_L , $n_p = [1, \dots, \overline{n_p}]$*
 $\sigma_{n_p-c_L}$ *Varianz der Dauer von Prozess n_p bei Losgröße c_L , $n_p = [1, \dots, \overline{n_p}]$*

Anhand der Formeln ist zunächst sehr deutlich erkennbar, dass die Standardabweichung der Prozessdauern einen erheblichen Einfluss auf den Fertigstellungstermin hat. Des Weiteren wird deutlich, dass der Mittelwert und die Standardabweichung der Fertigstellung gegenüber Variante 1 deutlich abnehmen (vgl. Abbildung 5-17 und Abbildung 5-20).

$$\begin{aligned} t_{sf-c_L} &\cong (c_L - 1) \\ &\times \max \left[\mu_{1-c_L} + 4 \times \sigma_{1-c_L}, \dots, \mu_{\overline{n_p}-c_L} + 4 \right. \\ &\quad \left. \times \sigma_{\overline{n_p}-c_L} \right] + \sum_{n_p=1}^{\overline{n_p}} \mu_{n_p-c_L} + 4 \times \sigma_{n_p-c_L} \end{aligned} \quad (5.83)$$

Ein erheblicher Nachteil dieser Variante ist, dass die einzelnen Fertigstellungstermine der Produktionsprozesse unverhältnismäßig hoch sind. Dies wird insbesondere klar, wenn man die Ergebnisse von Variante 3 mit den Ergebnissen von Variante 4 vergleicht.

Variante 3 entspricht dem Vorgehen mit einer „Taktzeit“. Hierbei wird die Taktzeit so gewählt, dass eine Überschreitung äußerst unwahrscheinlich ist. Die Konsequenzen dieses Vorgehens sind anhand der Modellierung erkennbar, eine hohe Wahrscheinlichkeit für Wartezeiten. Die Wartezeiten sind umso größer, je größer die Varianz der Dauer der Prozesse und je größer die Differenz der Erwartungswerte der Prozesse ist.

Variante 4 entspricht Variante 2 mit der Ausnahme, dass die Produktionslosgröße verringert wird. Hieraus folgt, dass ein Produktionsprozess so früh wie möglich startet. Abbildung 5-21 stellt die Verteilungen der Fertigstellung der einzelnen Produktionsprozesse für den bereits in Variante 3 simulierten Produktionsausschnitt dar. Deutlich zu erkennen ist die gravierende Reduktion der Fertigstellungszeitpunkte.

Aufgrund der komplexen internen Prozessabhängigkeiten ist eine mathematische Formulierung von Variante 4 nicht ohne weiteres möglich, weshalb auf die in Anhang 6 beigefügte Simulation verwiesen

wird. In Tabelle 5-1 sind Simulationsergebnisse eines exemplarischen Produktionsausschnitts für unterschiedliche quadrierte Variationskoeffizienten (CV^2) und Losgrößen (repräsentiert durch den c_L -Wert) dargestellt³⁴⁵.

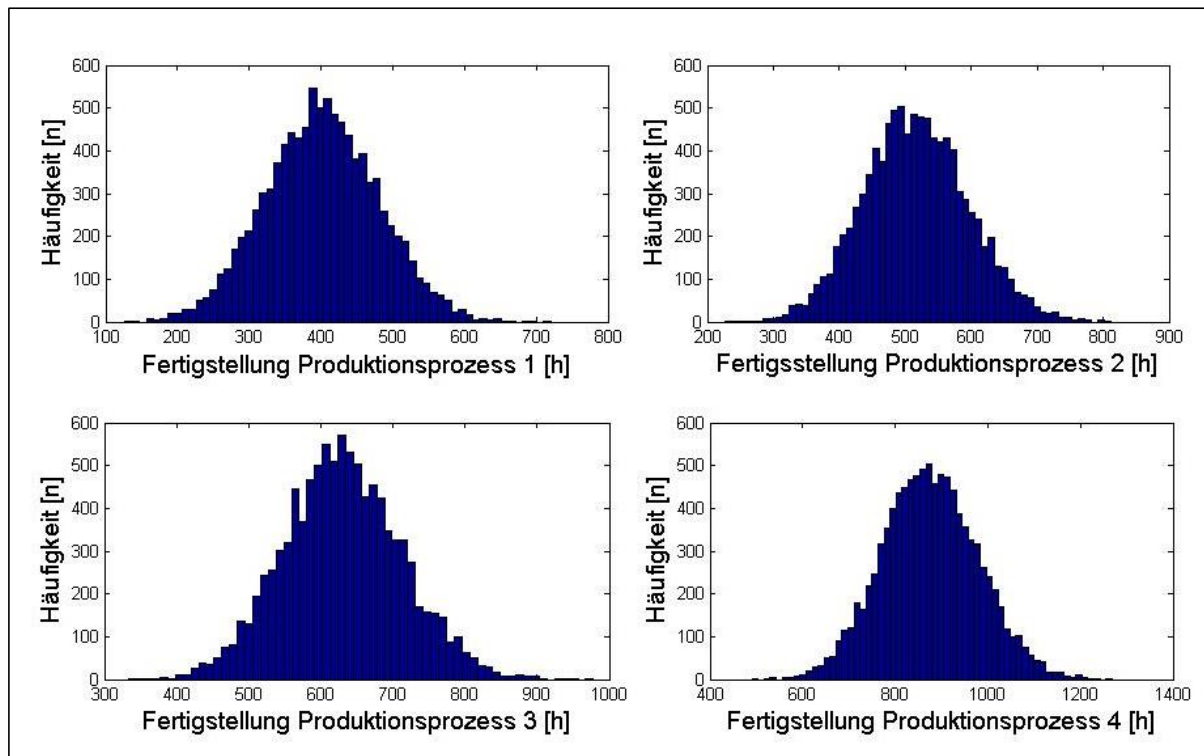


Abbildung 5-21: Exemplarische Darstellung von Variante 4³⁴⁶

Deutlich zu erkennen ist, dass mit steigenden quadrierten Variationskoeffizienten die Mittelwerte der Durchlaufzeiten³⁴⁷ (DLZ) und der Zwischenfertigstellungszeiten³⁴⁸ zwischen zwei Losgrößen (FZF) zunehmen (erkennbar an den Werten: μ -DLZ und μ -FZF)³⁴⁹. Identisches gilt ebenfalls für die Standardabweichung der Zwischenfertigstellungszeiten σ -ZFZ, den Mittelwert der Fertigstellungstermine μ_{ges} und die Standardabweichung der Fertigstellungstermine σ_{ges} . Eine Reduktion des quadrierten Variationskoeffizienten hat somit eine Reduktion der μ -DLZ-, μ -FZF-, σ -ZFZ-, μ_{ges} - und σ_{ges} -Werte zur Folge.

³⁴⁵ Die Simulation geht von vier Prozessen mit identischem Verhalten bzgl. der Prozessdauern aus (Erwartungswert= 400 [Zeiteinheiten]). Für andere Systemzusammensetzungen gelten die Aussagen ebenfalls (vgl. die zusätzlichen Simulationsergebnisse in Anhang 6).

³⁴⁶ Dies ist das Ergebnis mehrerer Simulationsdurchläufe, der in MATLAB programmierte Code ist in Anhang 6 beigelegt.

³⁴⁷ Die Durchlaufzeit ist in den dargestellten Beispielen die Zeit, die eine Losgröße benötigt um die Produktionsprozesse zu durchlaufen.

³⁴⁸ Die Zwischenfertigstellungszeit misst diejenige Dauer, die zwischen der Fertigstellung zweier Produktionsaufträge vergeht.

³⁴⁹ Bei kleinen Losanzahlen (d.h. wenig Lose werden produziert) ist zu ergänzen, dass der μ -ZFZ-Wert ungenauer ist, da der erste Wert der Zwischenfertigstellungszeiten überproportional groß ist (das System muss sich erst füllen). Dennoch wird die Tendenz korrekt wiedergegeben. Die „Systemfüllung“ ist ein generelles Problem, da es sich um ein nicht eingeschwungenes System handelt. Einer der großen Unterschiede zwischen dem Bauwesen und der stationären Industrie ist, dass es sich - aufgrund der relativ kleinen Anzahl der Wiederholungen - häufig um nicht eingeschwungene Systeme handelt.

Varianz der Prozessdauern	c_L	μ -DLZ	μ -ZfZ	σ -ZfZ	μ_{ges}	σ_{ges}
CV ² =0.05	1	1614,51	1614,51	172,68	1614,51	172,68
	5	427,25	168,21	111,67	841,07	78,83
	10	267,96	76,74	50,68	767,37	57,74
	15	204,76	49,21	31,29	738,14	46,12
	20	168,57	36,07	22,19	721,31	39,75
	25	145,13	28,42	16,95	710,47	35,57
	30	127,72	23,36	13,58	700,92	31,78
CV ² =0.1	1	1658,38	1658,38	223,71	1658,38	223,71
	5	477,23	187,59	124,55	937,96	93,73
	10	291,85	83,13	55,05	831,31	62,10
	15	217,64	52,24	33,35	783,55	48,87
	20	176,98	37,81	23,29	756,26	41,34
	25	150,59	29,56	17,55	738,92	36,27
	30	131,89	24,17	14,01	725,00	33,13
CV ² =0.2	1	1775,25	1775,25	291,68	1775,25	291,68
	5	518,51	203,51	135,63	1017,54	102,07
	10	305,54	87,02	57,71	870,17	63,53
	15	224,43	53,98	34,23	809,71	48,86
	20	181,08	38,81	23,86	776,19	41,46
	25	153,66	30,13	17,95	753,17	36,76
	30	134,32	24,56	14,24	736,80	33,10
CV ² =0.3	1	1873,27	1873,27	335,00	1873,27	335,00
	5	535,90	210,43	139,17	1052,15	102,72
	10	309,81	88,54	58,58	885,43	63,47
	15	227,23	54,61	34,78	819,12	49,05
	20	182,39	39,10	24,02	782,00	41,70
	25	154,40	30,36	18,06	758,98	36,91
	30	135,10	24,73	14,30	742,05	33,32

Tabelle 5-1: Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Variationskoeffizienten und Losgrößen für Variante 4 (ZE=Zeiteinheiten) ³⁵⁰

Des Weiteren sinken mit steigendem c_L -Wert die μ -DLZ-, μ -ZfZ-, σ -ZfZ-, μ_{ges} - und σ_{ges} -Werte, wobei aufgrund des in Formel 5.81 dargestellten Zusammenhangs die Reduktion durch eine Losgrößenreduktion zu Beginn deutlich größer ist (d.h. je größer der c_L -Wert, desto „weniger“ bringt eine weitere Reduktion der Losgröße³⁵¹ - dies ist deutlich an der Entwicklung der μ_{ges} - und σ_{ges} -Werte erkennbar).

³⁵⁰ CV= Variationskoeffizient [-]; c_L = Losgröße [-]; μ -DLZ = Mittelwert der Durchlaufzeiten [Zeiteinheit]; μ -ZfZ = Mittelwert der Zwischenfertigstellungszeiten [Zeiteinheit]; σ -ZfZ= Standardabweichung der Zwischenfertigstellungszeiten [Zeiteinheit]; μ_{ges} = Mittelwert der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit]; σ_{ges} = Standardabweichung der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit].

Für die Fälle mit $c_L = 1$ entspricht die Simulation Variante 2.

³⁵¹ Ursache hierfür ist, dass die Steigung der Wurzelfunktion mit steigenden Werten abnimmt.

Sehr deutlich wird somit erneut der positive Einfluss der Reduktion der Losgröße und der Varianz (bzw. Standardabweichung) der Prozessdauern.

Variante 5 entspricht Variante 4 mit einer Begrenzung der zwischen den einzelnen Produktionsprozessen befindlichen Zwischenprodukte³⁵². Unter Zwischenprodukten ist in diesem Zusammenhang genauer die Anzahl der zwischen zwei Produktionsprozessen befindlichen Lose zu verstehen. Eine Begrenzung der Zwischenprodukte macht jedoch nur Sinn, insofern der c_L -Wert ausreichend groß ist - d.h. die Anzahl der Lose muss größer als die erlaubte Anzahl an Zwischenprodukten sein. Das Vorgehen dieser Kopplungsvariante entspricht einem Kanban-System³⁵³. Die Dimensionierung der Anzahl der jeweils erlaubten Zwischenprodukte hängt insbesondere von dem Erwartungswert und der Varianz der Prozessdauern der Produktionsprozesse ab. Hierbei gilt generell, dass die erlaubten Zwischenprodukte nach einem Produktionsprozess umso größer sein sollten, je größer die Varianzen der Prozessdauern von Vorgänger- und Nachfolgerprozess sind. Hierdurch wird verhindert, dass der Nachfolgerprozess eine zu geringe Auslastung hat. Der qualitative Ablauf von Variante 5 ist in Abbildung 5-22 dargestellt.

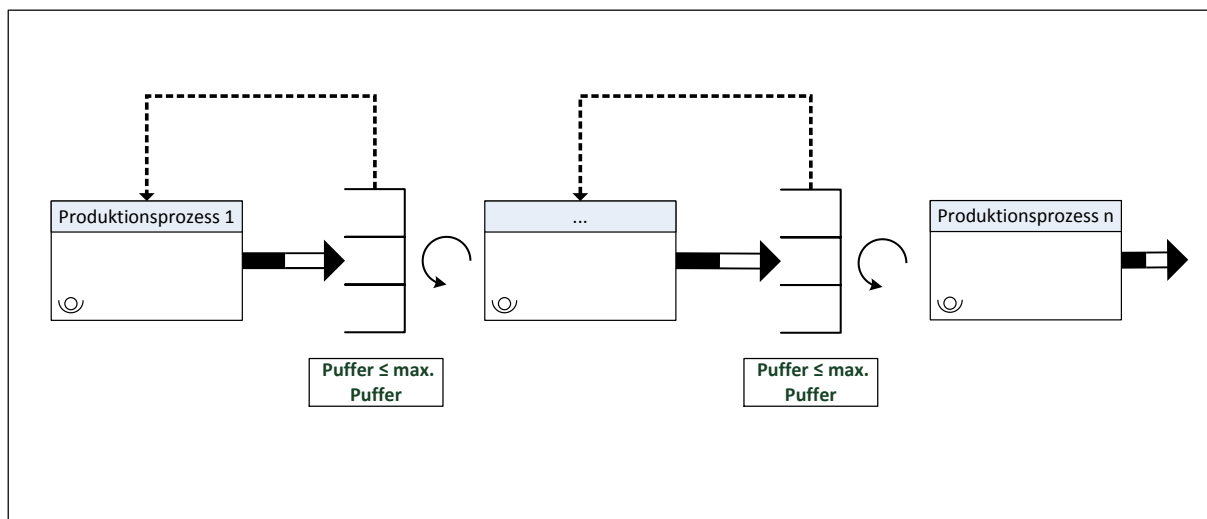


Abbildung 5-22: Schematische Darstellung Variante 5

Der Simulationscode für diese Variante befindet sich in Anhang 7. Die in Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 dargestellten Ergebnisse deuten den Einfluss der Pufferbegrenzung an³⁵⁴. Anhand der beiden Abbildungen ist klar zu erkennen, dass die μ -DLZ mit steigender Pufferbegrenzung zunehmen, wohingegen μ -ZfZ abnimmt. Aus dem Vergleich der μ_{ges} - und σ_{ges} -Werte folgt, dass eine höhere Pufferbegrenzung zu geringeren Werten führt.

Ein wesentliches Problem an dieser Variante ist, dass sie nur funktioniert, insofern identische Produkte oder Produkte mit identischen Prozessdauer-Wahrscheinlichkeitsverteilungen hergestellt werden. Dies liegt daran, dass zwischen jedem einzelnen Prozess eine feste Anzahl der erlaubten Zwischenprodukte festgelegt wird, die von den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Prozessdauern abhängt. Wechseln die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Prozessdauern, stimmen die festgelegten Anzahlen der erlaubten Zwischenprodukte nicht mehr und unerwünschte Nebeneffekte treten auf (z.B. hohe Wartezeiten, geringe Auslastungen, hohe Varianzen usw.). Da im Bauwesen sehr häufig unterschiedliche

³⁵² vgl. Kapitel 3 bzgl. der genauen Definition.

³⁵³ Für eine Erläuterung siehe z.B. (Rother & Harris 2006).

³⁵⁴ Eigentlich müsste die Pufferanzahl in Abhängigkeit von den Losgrößen gewählt werden, dieses Vorgehen wurde hier nicht gewählt, um dem Leser den Einfluss der Begrenzung der Puffer im Zusammenhang mit den c_L -Werten besser darstellen zu können.

Produkte - mit ähnlichen Prozessen, die unterschiedliche Wahrscheinlichkeits-verteilungen der Prozessdauern haben können - hergestellt werden, ist diese Variante für das Bauwesen ohne Anpassungen daher in vielen Fällen nicht geeignet.

Der wesentliche Vorteil dieser Steuerungsmethode ist, dass im Vergleich zu Variante 4 kürzere Durchlaufzeiten realisiert werden und eine geringere Anzahl von Zwischenprodukten im System vorhanden ist. Bei zu geringer Pufferung entsteht jedoch ein deutlicher Anstieg der μ_{ges} -Werte (vgl. Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3).

Varianz der Prozessdauern	c_L	μ -DLZ	μ -ZfZ	σ -ZfZ	μ_{ges}	σ_{ges}
CV ² =0.05	1	1612,18	1612,18	174,35	1612,18	174,35
	5	413,48	173,32	110,23	866,59	80,15
	10	240,36	82,01	50,88	820,11	55,13
	15	170,77	53,94	31,39	809,13	44,79
	20	133,06	40,31	22,62	806,18	39,45
	25	109,13	32,28	17,52	806,90	34,68
	30	92,03	26,81	14,29	804,32	31,54
CV ² =0.1	1	1667,42	1667,42	220,04	1667,42	220,04
	5	458,89	192,47	122,76	962,36	93,82
	10	260,00	88,60	54,74	886,04	60,25
	15	181,75	57,29	33,39	859,28	46,99
	20	139,31	42,21	23,63	844,27	39,96
	25	113,25	33,52	18,33	838,08	33,61
	30	95,34	27,68	14,69	830,46	30,97
CV ² =0.2	1	1772,72	1772,72	274,92	1772,72	274,92
	5	498,59	209,81	133,27	1049,04	101,33
	10	272,29	92,98	57,13	929,83	62,31
	15	186,43	58,99	34,23	884,89	47,40
	20	142,83	43,28	24,34	865,66	38,28
	25	115,04	34,00	18,50	849,94	32,23
	30	96,76	28,11	14,84	843,24	29,49
CV ² =0.3	1	1853,96	1853,96	337,35	1853,96	337,35
	5	516,10	215,84	138,73	1079,18	99,57
	10	275,66	94,17	57,77	941,70	63,13
	15	188,85	59,64	34,85	894,63	45,74
	20	144,09	43,71	24,50	874,19	39,35
	25	116,23	34,31	18,70	857,71	33,70
	30	97,14	28,24	15,01	847,32	30,08

Tabelle 5-2: Simulationsergebnisse für den in Tabelle 5-1 dargestellten Produktionsausschnitt mit Pufferbegrenzung „1“ zwischen den einzelnen Prozessen für Variante 5 (ZE=Zeiteinheiten)³⁵⁵

³⁵⁵ Die Puffer wurden wie folgt aufgeteilt: 1 Losegrößen zwischen Prozess 1 und 2, 1 zwischen Prozess 2 und 3 und 1 zwischen Prozess 3 und 4.

Varianz der Prozessdauern	c_L	μ -DLZ	μ -ZfZ	σ -ZfZ	μ_{ges}	σ_{ges}
CV ² =0.05	1	1619,36	1619,36	168,76	1619,36	168,76
	5	427,47	168,14	112,30	840,71	79,28
	10	268,29	76,86	51,03	768,61	57,22
	15	200,36	49,29	31,36	739,38	45,84
	20	163,25	36,02	22,17	720,50	40,10
	25	138,34	28,41	17,00	710,27	36,05
	30	118,91	23,46	13,70	703,76	31,93
CV ² =0.1	1	1656,29	1656,29	227,06	1656,29	227,06
	5	479,81	188,13	125,22	940,67	86,27
	10	288,94	83,15	54,07	831,52	62,14
	15	214,29	52,04	33,03	780,57	50,09
	20	170,79	37,89	23,44	757,89	42,10
	25	142,78	29,57	17,74	739,29	35,99
	30	123,01	24,14	13,95	724,24	31,57
CV ² =0.2	1	1766,20	1766,20	286,33	1766,20	286,33
	5	515,59	202,02	133,85	1010,12	101,72
	10	304,19	87,25	57,54	872,53	62,65
	15	221,04	53,98	34,11	809,68	50,04
	20	173,52	38,80	23,90	775,93	42,90
	25	145,71	30,19	17,99	754,79	35,05
	30	125,30	24,64	14,18	739,11	31,97
CV ² =0.3	1	1867,38	1867,38	344,95	1867,38	344,95
	5	533,62	210,46	138,47	1052,28	104,51
	10	309,40	88,68	58,77	886,75	65,71
	15	224,37	54,74	34,51	821,13	49,36
	20	177,65	39,12	24,20	782,30	41,29
	25	147,43	30,37	17,95	759,35	35,69
	30	125,79	24,75	14,30	742,42	32,90

Tabelle 5-3: Simulationsergebnisse für die einheitliche Puffergröße „3“ für Variante 5 (ZE=Zeiteinheiten)³⁵⁶

³⁵⁶ D.h. zwischen Prozess 1 und 2 sind 3 Pufferplätze (in Form einer Losgröße), zwischen Prozess 2 und 3 sind 3 Pufferplätze und zwischen Prozess 3 und 4 sind 3 Pufferplätze. Erneut sei darauf hingewiesen, dass für kleine c_L -Werte fast keine Steuerung stattfindet. Dies liegt daran, dass bei kleinen c_L -Werten die Wahrscheinlichkeit der Erreichung der Pufferbegrenzung stark abnimmt (und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Steuerungsmechanismus in Gang gesetzt wird).

Variante 6 stellt einen Kompromiss zwischen Variante 5 und Variante 4 dar. Durch Puffer zwischen den Produktionsprozessen n und $n-1$ ist es möglich, dass ein Ausgleich zwischen hohen und niedrigen Prozessdauern stattfindet³⁵⁷. Durch die Beschränkung der Puffer sinkt insbesondere der Erwartungswert der Durchlaufzeiten, d.h. diejenige Zeit, die ein Produkt in der Fertigung verbringt. Da die einzelnen Produktionsprozesse unterschiedliche Prozessdauern mit unterschiedlichen Erwartungswerten und Varianzen haben können, ist es schwierig, die individuelle Puffergröße zu bestimmen. Insbesondere bei der Produktion unterschiedlicher Produkte, die unterschiedliche Prozessdauern besitzen, ist dies ein erhebliches Problem, da der vorhandene Puffer bei Veränderungen immer angepasst werden müsste. Im Bauwesen ist dies insbesondere ein Problem, da die einzelnen Produktionsaufträge bezüglich ihrer Prozessdauer sehr häufig voneinander abweichen. Dies resultiert zum einen daher, dass die Produktionsaufträge nur in den seltensten Fällen komplett identisch sind und zum anderen daher, dass die Produktionsbedingungen sich verändern können³⁵⁸. Ein wesentlicher Vorteil dieser Variante ist, dass pro durch diese Kopplungsvariante gesteuertem Produktionsausschnitt nur eine Größe gemanagt werden muss (wohingegen bei Variante 5 zwischen jedem Prozess). Eine Anpassung ist demnach im Vergleich zu Variante 5 deutlich einfacher. Gleichzeitig ist die Auswirkung von Veränderungen bzgl. der einzelnen Prozessdauern durch Veränderungen der Produktionsaufträge nicht so gravierend wie bei Variante 5, da die Puffer sich im Produktionssystem entsprechend der individuellen Dauer der Produktionsaufträge verteilen (d.h. die Puffer sind mobil und verteilen sich je nach Bedarf). Diese Kopplungsvariante entspricht der sog. CONWIP-Methode („constant work in process“)³⁵⁹. Der Ablauf von Variante 5 ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

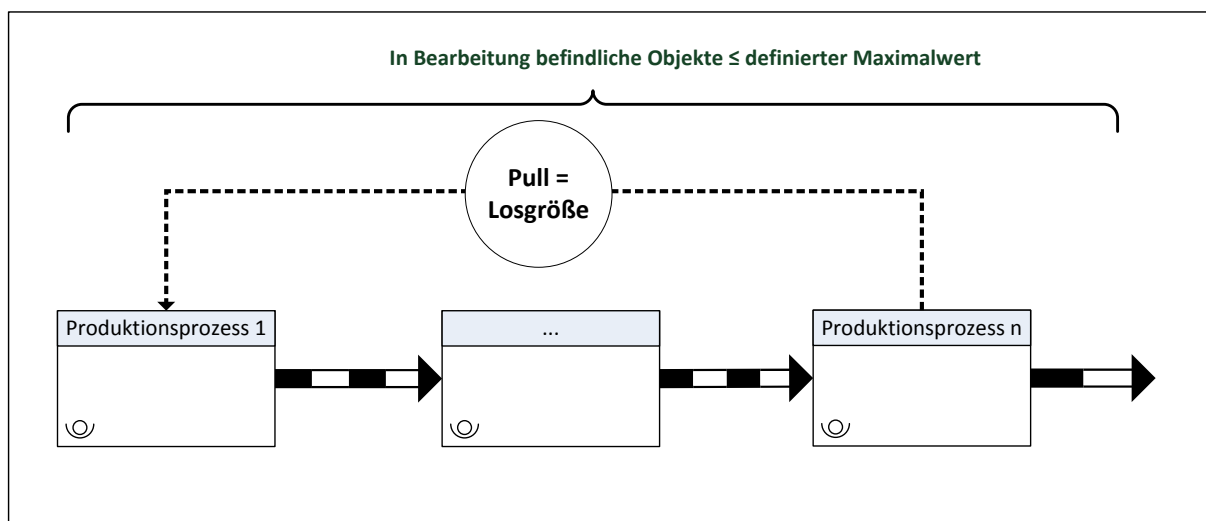


Abbildung 5-23: Schematische Darstellung Variante 6

³⁵⁷ Bezogen auf einen Produktionsprozess n ist es bei entsprechender Dimensionierung des Puffers möglich, dass dessen Varianzen in der Prozessdauer ausgeglichen werden und der Nachfolgerprozess $n+1$ kontinuierlich mit dem Erwartungswert der Prozessdauer von n gespeist werden kann.

³⁵⁸ z.B. ist die Produktionsmenge eines Dammbauschnitts vom Verlauf der ursprünglichen Geländeoberkante abhängig. Hieraus folgt, dass der Produktionsprozess „Dammbau“ je nach Beschaffenheit der Geländeoberkante längere oder kürzere Prozessdauern aufweist, während z.B. der nachfolgende Produktionsprozess „Frostschuttschicht erstellen“ eine gleichmäßige Produktionsmenge besitzen kann.

³⁵⁹ Für weitere Informationen siehe z.B. (Erlach 2007).

Der Unterschied zwischen Variante 6 und 5 wird beim Vergleich von Tabelle 5-2 und Tabelle 5-4 deutlich³⁶⁰. Die Werte μ -ZFZ, μ_{ges} und σ_{ges} sind bei Variante 6 geringer (wobei der Vorteil davon abhängig ist, wie groß die jeweiligen Puffer gewählt werden³⁶¹)³⁶².

Varianz der Prozessdauern	c_L	μ -DLZ	μ -ZFZ	σ -ZFZ	μ_{ges}	σ_{ges}
CV ² =0.05	1	1610,81	1610,81	176,78	1610,81	176,78
	5	425,08	167,40	110,23	837,01	74,72
	10	267,98	76,49	50,67	764,94	57,07
	15	202,33	49,16	31,09	737,44	45,33
	20	163,86	36,03	22,12	720,70	39,21
	25	136,88	28,43	16,94	710,79	35,84
	30	117,88	23,41	13,53	702,38	31,62
CV ² =0.1	1	1654,20	1654,20	230,76	1654,20	230,76
	5	476,91	187,52	124,21	937,60	95,55
	10	291,66	83,23	54,68	832,33	63,70
	15	214,89	52,25	33,32	783,70	48,58
	20	172,51	37,86	23,21	757,20	41,13
	25	142,46	29,62	17,59	740,38	37,73
	30	121,62	24,26	14,12	727,82	32,39
CV ² =0.2	1	1778,75	1778,75	293,26	1778,75	293,26
	5	517,43	203,08	135,41	1015,41	105,05
	10	303,40	86,83	57,54	868,27	65,92
	15	221,66	53,88	34,46	808,15	49,06
	20	174,95	38,79	23,67	775,76	43,03
	25	145,06	30,11	17,94	752,78	36,59
	30	123,00	24,64	14,35	739,12	32,10
CV ² =0.3	1	1882,72	1882,72	335,01	1882,72	335,01
	5	535,27	210,92	140,15	1054,60	102,20
	10	311,60	89,04	58,29	890,38	65,64
	15	225,95	54,64	34,98	819,66	48,62
	20	177,94	39,14	24,06	782,77	40,42
	25	146,48	30,36	18,05	759,01	38,42
	30	124,15	24,72	14,25	741,58	32,38

Tabelle 5-4: Simulationsergebnisse für Variante 6 für den in Abbildung 5-23 dargestellten Produktionsausschnitt mit absoluter Pufferbegrenzung „7“ (ZE=Zeiteinheiten)³⁶³

³⁶⁰ Die Werte in Tabelle 5-2 und Tabelle 5-4 entsprechen der gleichen zugelassen Puffergröße. Bei Variante 5 sind in diesem Fall maximal alle Puffer (d.h. 3) und die jeweils vorhandenen Produktionsprozesse (d.h. 4) belegt (d.h. maximal 7 Lose befinden sich im System).

³⁶¹ Werden bei beiden Varianten sehr hohe Pufferbeschränkungen gewählt, so nähert sich Variante 5 und 6 Variante 4 an (vgl. Tabelle 5-1, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4).

³⁶² Hopp and Spearman schreiben hierzu: „However, we should point out that there is a fundamental difference between kanban and CONWIP in that the lead time in pure kanban systems is zero while under CONWIP it is small“ (Hopp & Spearman 2011).

³⁶³ Zugelassen wurden 7 Puffer. Der MATLAB-Simulationscode befindet sich in Anhang 8.

Varianz der Prozessdauern	c_L	μ -DLZ	μ -ZfZ	σ -ZfZ	μ_{ges}	σ_{ges}
CV ² =0.05	1	1610,90	1610,90	166,85	1610,90	166,85
	5	399,75	180,51	110,34	902,54	84,47
	10	222,58	88,38	51,42	883,80	59,88
	15	156,14	59,32	33,20	889,76	52,07
	20	120,90	44,81	24,34	896,10	43,03
	25	98,35	35,99	19,34	899,82	38,80
	30	83,04	30,09	15,85	902,59	36,17
CV ² =0.1	1	1660,21	1660,21	229,73	1660,21	229,73
	5	444,60	200,86	124,40	1004,32	100,96
	10	240,38	95,55	56,21	955,53	65,28
	15	166,15	63,07	35,54	946,11	52,38
	20	126,06	46,82	25,53	936,49	45,56
	25	102,33	37,44	19,99	935,94	38,44
	30	85,64	31,02	16,23	930,46	35,64
CV ² =0.2	1	1764,77	1764,77	297,08	1764,77	297,08
	5	479,13	216,60	132,65	1083,01	107,74
	10	252,98	100,56	58,95	1005,60	69,09
	15	171,62	65,25	36,38	978,74	53,32
	20	129,15	47,94	26,21	958,74	44,74
	25	104,30	38,15	20,40	953,66	38,30
	30	87,22	31,59	16,48	947,61	34,58
CV ² =0.3	1	1865,04	1865,04	323,64	1865,04	323,64
	5	494,99	224,19	136,64	1120,95	113,59
	10	257,21	102,17	59,98	1021,68	67,98
	15	173,11	65,74	36,94	986,06	53,25
	20	130,90	48,57	26,54	971,39	45,76
	25	105,01	38,37	20,44	959,21	39,30
	30	87,72	31,77	16,65	953,14	34,94

Tabelle 5-5: Simulationsergebnisse für die einheitliche Puffergröße „3“ für Variante 6 (ZE=Zeiteinheiten)

In der Praxis wird versucht, die Auslastung von Bauproduktionsprozessen zu steigern und Wartezeiten zu minimieren. Um dies zu erreichen, starten Bauproduktionsfaktoren Nebenbeschäftigungen³⁶⁴, wenn sie aufgrund von mangelnder Leistungsfähigkeit des Vorgängerprozesses warten müssen. Hierdurch können weitere Verzögerungen eintreten, da der Nachfolgerprozess entweder erst die begonnen Nebenbeschäftigungen beendet oder zusätzliche Rüstzeiten³⁶⁵ notwendig werden, bevor die betrachteten Tätigkeiten aufgenommen werden können³⁶⁶. Eine Möglichkeit, um dies zu verhindern, ist das Planen

³⁶⁴ Nebenbeschäftigungen aus Sicht des betrachteten Produktionsprozesses. Umgekehrt kann der betrachtete Produktionsprozess aus Sicht eines weiteren Produktionsprozesses, an dem die Bauproduktionsfaktoren beteiligt sind, eine Nebenbeschäftigung sein.

³⁶⁵ In dem hier dargestellten Zusammenhang können Rüstzeiten z.B. zusätzliche Transporte von Maschinen und Personen oder das Einrichten der Arbeitsstation sein.

³⁶⁶ Ein weiterer Punkt, der diese Aussage unterstützt, ist das Thema Behinderungen. Eine Besonderheit ist, dass im Bauwesen sehr häufig mit Subunternehmern gearbeitet wird, die für einen bestimmten Termin und eine bestimmte Dauer beauftragt werden. D.h., falls Zwischentermine nicht eingehalten werden, kann es zu Behinderungsanzeigen oder Ähnlichem kommen.

mit festen Fertigstellungsterminen. Diese Variante hat jedoch den Nachteil, dass, falls der Vorgängerprozess nicht zu dem eingeplanten Termin seine Arbeiten abgeschlossen hat, ggf. andere Tätigkeiten aufgrund des ansonsten festen Terminplans begonnen werden müssen³⁶⁷. Hieraus folgt, dass aus einer zu späten Fertigstellung häufig weitere Verzögerungen entstehen können. Umgekehrt gilt nicht, dass niedrige Prozessdauern des Vorgängerprozesses zu niedrigen Prozessdauern des Nachfolgerprozesses führen. Des Weiteren führen kurze Prozessdauern des Vorgängerprozesses insbesondere nicht automatisch dazu, dass der Nachfolgerprozess direkt nach Prozessabschluss beginnt, sondern häufig erst mit dem jeweiligen geplanten Starttermin oder zumindest mit einer gewissen Verzögerung - je nachdem, ob er neben dem betrachteten Prozess noch weitere Tätigkeiten ausführen muss und wie weit er mit dem vorherigen Auftrag ist. Dies führt dazu, dass die resultierende Gesamtverteilung zum einen einen höheren Erwartungswert für die Produktionsdauer hat und zum anderen führt es dazu, dass die Streuung der Produktionsdauern um den Mittelwert bei hohen Produktionsdauern größer und bei kleinen geringer wird (d.h. die Dichtefunktion wird linkslastig und nach rechts verschoben). In Abbildung 5-24 ist dieser Zusammenhang qualitativ dargestellt. Die Verteilungen sind das Ergebnis einer Simulation mit normalverteilten Prozessdauern. Die obere Verteilung geht davon aus, dass eine verspätete Fertigstellung keine Konsequenzen hat, und dass eine frühere Fertigstellung eines Prozesses zu keinerlei Wartezeiten am Nachfolgerprozess führt. Die untere Verteilung geht davon aus, dass die Prozesse bei zu früher Fertigstellung warten müssen, und dass bei verspäteter Fertigstellung zusätzliche Rüstzeiten entstehen. Dieser Zusammenhang wurde bei den obigen Simulationen nicht berücksichtigt, da die genauen Wirkungsmechanismen bisher unbekannt sind.

³⁶⁷ Dies ist insbesondere der Fall bei der Beauftragung von Subunternehmern und führt dazu, dass aus Sicht des Subunternehmers ein aufwendiges Multiprojektmanagement notwendig wird. Die daraus entstehenden Nachteile fallen letztlich zu Lasten des Auftraggebers. Dies resultiert daher, dass - unter der Annahme der Subunternehmer muss langfristig schwarze Zahlen schreiben - die zusätzlich entstehenden Kosten auf Kunden vom Subunternehmer verteilt werden müssen.

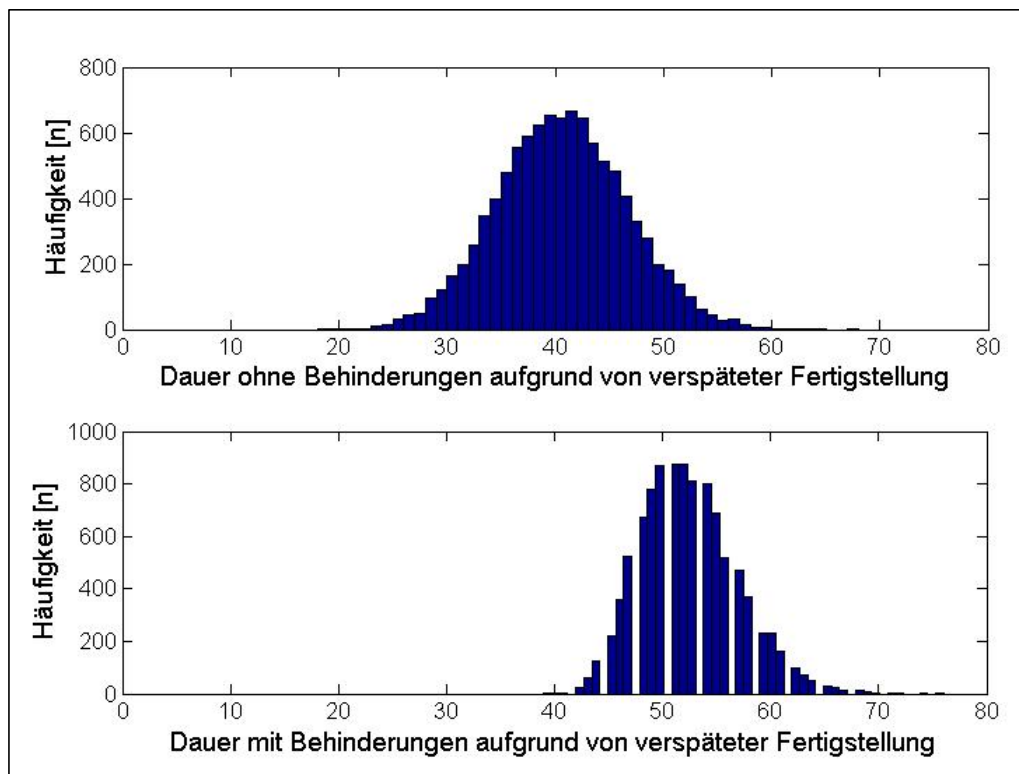


Abbildung 5-24: Qualitativer Einfluss von verspäteter Fertigstellung auf die Entwicklung der Gesamtdauer der Produktion

Bei den Varianten 1 und 3 entfällt dieses Problem, da die Produktionsprozesse entkoppelt voneinander stattfinden³⁶⁸. Für Varianten mit kleinen Losgrößen ist dieses Problem deutlich geringer, da kontinuierlicher gearbeitet werden kann. Je größer die Varianz der Fertigstellungstermine der einzelnen Losgrößen, desto gravierender ist der beschriebene Einfluss der zusätzlichen Verzögerungen. Dies resultiert aus den größeren zusammenhängenden Wartedauern. Je länger diese sind, desto größer ist der Anreiz der einzelnen Produktionsprozesse weiteren Tätigkeiten nachzugehen und somit die individuelle Prozess-Auslastung zu steigern.

Im Gegensatz zur stationären Industrie werden identische Produktionsprozesse im Bauwesen deutlich seltener durchlaufen. Beispielsweise wird in der stationären Industrie ein Montageprozess so häufig durchlaufen, wie Produkte hergestellt werden (d.h. ein Produktionsprozess wird pro Produkt in der Regel einmal durchlaufen). Demgegenüber wiederholt sich im Bauwesen ein bestimmter Produktionsprozess pro hergestelltem Produkt mehrfach - d.h. dem zu erstellenden Bauwerk - in Abhängigkeit von Größe und Standardisierbarkeit des Bauwerks (d.h. ein Produktionsprozess wird pro Bauwerk mehrmals durchlaufen). Gleichzeitig sind die Prozessdauern (oder Taktzeiten) in der stationären Industrie deutlich geringer als im Bauwesen. D.h. in der Regel wird im Bauwesen ein Produktionsprozess seltener durchlaufen, der gleichzeitig höhere Prozessdauern besitzt, als in der stationären Industrie. Des Weiteren ist die Varianz der Prozessdauern im Bauwesen aufgrund der schlechteren Standardisierbarkeit tendenziell größer als in der stationären Industrie³⁶⁹.

³⁶⁸ Hier wird deutlich, welche Rolle die Arten der Pufferungen haben (Zeit, Kapazität und Zwischenprodukte). Die Planung nach Variante 1 und 3 hat aufgrund der höheren Kapazitäts- bzw. Zeitpuffer eine geringere Auslastung (da immer mit der höchsten Prozesszeit geplant wird).

³⁶⁹ z.B. können in einer Produktionshalle einfacher standardisierte Produktionsabläufe realisiert werden als auf einer Baustelle.

Bei der Planung und Steuerung von Produktionsprozessen hat dieses Verhalten deutliche Konsequenzen. Wird ein Produktionsprozess seltener durchlaufen und besitzt eine längere Dauer mit höherer Varianz, so ist dies gleichzusetzen mit schlechterer Kalkulierbarkeit.

Zur Verdeutlichung ein fiktives Beispiel:

Beträgt ein Produktionsprozess in der Automobilbranche z.B. eine Dauer von 1 min, so benötigt ein Produktionsprozess im Bauwesen mehrere Stunden, 1 Tag oder länger. Wird dieser Produktionsprozess im Bauwesen z.B. 10-mal durchlaufen, so wird ein Produktionsprozess in der Automobilbranche z.B. mehrere 1000-mal durchlaufen.

Allgemein gilt, je häufiger ein Produktionsprozess durchlaufen wird und je geringer die Varianz des Produktionsprozesses, desto wahrscheinlicher ist es, dass große Dauern (oder geringe Leistungswerte) einzelner Prozessdurchläufe durch kurze Dauern (oder große Leistungswerte) einzelner Prozessdurchläufe ausgeglichen werden³⁷⁰. Die Wahrscheinlichkeit, dass nur niedrige (d.h. Werte die kleiner als der Erwartungswert sind) oder nur hohe Werte (d.h. Werte die größer als der Erwartungswert sind) auftreten, wird mit jeder Wiederholung geringer. Die Wahrscheinlichkeit, dass nur höhere Werte als der Erwartungswert gezogen werden ist:

$$P(\text{nur } x \geq \mu_{x_{np}})_{ges} = \prod_{i=1}^{\bar{i}} P(x \geq \mu_{x_{np}})_i = 0,5^{\bar{i}} \quad (5.84)$$

$P(\text{nur } x \geq \mu_{x_{np}})_{ges}$	Wahrscheinlichkeit, dass nur Werte höher oder gleich dem Erwartungswert gezogen werden
x	Zufallszahl (hier Prozessdauer)
$\mu_{x_{np}}$	Erwartungswert der Zufallszahl x
$P(x \geq \mu_{x_{np}})_i$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Prozessdauer auftritt, die höher oder gleich dem Erwartungswert ist. $i = [1, \dots, \bar{i}]$. $\bar{i}$ ist die Anzahl der Durchläufe des Prozesses (und damit abhängig vom c_L -Wert)

Die Gegenwahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass nicht nur Werte gezogen werden die höher als der Erwartungswert sind, ist:

$$\begin{aligned} &P(\text{nicht nur } x \geq \mu_{x_{np}})_{ges} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^{\bar{i}} P(x \geq \mu_{x_{np}})_i = 1 - 0,5^{\bar{i}} \end{aligned} \quad (5.85)$$

$P(\text{nicht nur } x \geq \mu_{x_{np}})_{ges}$	Wahrscheinlichkeit, dass nicht nur Werte höher oder gleich dem Erwartungswert gezogen werden
--	--

³⁷⁰ Umgekehrt gilt allerdings auch, dass niedrige Dauern (bzw. hohe Leistungsfähigkeiten) durch hohe Dauern (bzw. niedrige Leistungsfähigkeiten) ausgeglichen werden.

Deutlich erkennbar ist, dass mit größerem $\bar{t}$ die Gegenwahrscheinlichkeit zunimmt. D.h. mit steigender Anzahl an Prozessdurchläufen sinkt die Wahrscheinlichkeit nur hohe Werte für die Prozessdauern zu erhalten.³⁷¹

Aus Sicht des Risikomanagements ist somit klar, dass bei geringer Durchlaufanzahl und höheren Schwankungen ein höheres Risiko für lange Prozessdauern (oder schlechtere Leistung) besteht.

Je größer die Varianz der Produktionsprozessdauern ist, desto wahrscheinlicher ist das Auftreten von kleinen und großen Prozessdauern. Z.B. gilt für normalverteilte Prozessdauern:

$$P(x \geq \bar{x}) = 1 - \Phi(z), \text{ für } \bar{x} \geq \mu \quad (5.86)$$

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma} \quad (5.87)$$

D.h. je kleiner z , desto größer $P(x \geq \bar{x})$, da $\Phi(z)$ für größere z -Werte einen größeren Wert annimmt. Daraus folgt, je größer σ ist, desto größer ist $P(x \geq \bar{x})$. Hieraus folgt, dass mit steigender Varianz bzw. Standardabweichung der Prozessdauern die Wahrscheinlichkeit für hohe Fertigstellungszeiten für Produktionsabschnitte zunimmt.

Da durch Losgrößenreduktion letztlich die Varianzen und der Erwartungswert der Prozessdauern reduziert (vgl. Formel 5.70 und 5.71) und gleichzeitig mehr Prozessdurchläufe notwendig werden, ist das entstehende Risiko geringer bei kleinen Losgrößen.³⁷²

Wie anhand der obigen Ausführungen gezeigt werden konnte, haben große Losgrößen größere Prozessdauervarianzen zur Folge. Große Prozessdauervarianzen führen zur Notwendigkeit, größere Pufferungen (in Form von Zeit, Kapazität oder Zwischenprodukten) zwischen den Produktionsprozessen einzuplanen, da der Fertigstellungszeitpunkt eine weitere Streuung aufweist. Des Weiteren wurde erläutert, dass eine frühere Fertigstellung des Vorgängerprozesses nicht unbedingt eine frühere Fertigstellung des Nachfolgerprozesses bedeutet - d.h. Terminüberschreitungen haben einen negativen Einfluss, frühzeitige Fertigstellungen aber kaum einen positiven Einfluss. Je kleiner die Losgröße, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für lange Prozessdauern des Vorgängerprozesses und damit gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für lange Wartezeiten beim Folgeprozess.

Für das Bauwesen ergeben sich somit insbesondere folgende Punkte:

- Das Bauwesen ist mit hoher Prozesssicherheit zu planen und zu steuern. Dies ist insbesondere eine Konsequenz aus den relativ hohen Prozessvarianzen - bedingt durch die Eigenschaften der Bauproduktion³⁷³ - und der geringen Durchlaufanzahl der Produktionsprozesse sowie aufgrund der erwähnten zusätzlichen negativen Effekte bzgl. der Entwicklung der Varianzen und des Erwartungswerts bei nicht termingerechter Fertigstellung.
- Kleinere Losgrößen sind insbesondere dort sinnvoll, wo sie nicht zu einer überproportionalen Steigerung des Erwartungswerts und der Varianz der Prozessdauer führen. In den Fällen, wo ein „degressiver“ Zusammenhang zwischen Losgrößenreduktion und der Entwicklung des

³⁷¹ Identisches gilt auch für Leistungswerte. Da gilt: $Leistung = \frac{\text{Produktionsmenge}}{\text{Prozessdauer}}$, ist zu beachten, dass aus hohen Prozessdauern kleine Leistungswerte resultieren (vgl. Anhang 2).

³⁷² Im Bereich des Risikomanagements ist dieses Vorgehen unter dem Begriff Diversifikation bekannt. Das Gesamtrisiko ist dadurch geringer, dass der gleichzeitige Ausfall mehrerer kleinerer Investitionen deutlich geringer ist als der Ausfall einer großen Investition (Umgangssprachlich das sog. Klumpenrisiko).

³⁷³ Vgl. Kapitel 3.

Erwartungswerts und der Varianz der Prozessdauer vorherrscht (vgl. Abbildung 5-15), ist genau zu prüfen, ob kleine Losgrößen einen Vorteil für die Produktion darstellen³⁷⁴. Für die Fälle, in denen die Entwicklung des Erwartungswerts und der Varianz der Prozessdauern unabhängig von der Losgröße sind, ist eine Losgrößenreduktion nicht sinnvoll.

- Ein wesentliches Thema des Bauwesens ist die Synchronisation der einzelnen Gewerke. Zur Synchronisation wird eine gute Vorhersagbarkeit der Prozessdauern benötigt. Je größer die zu synchronisierende Menge ist, desto größer muss die Vorhersagegenauigkeit sein, um eine identische Verfügbarkeit zu garantieren. Das Bauwesen ist durch ein Projektumfeld gekennzeichnet, dass die Synchronisierbarkeit zusätzlich negativ beeinflusst (unbekannte Projektpartner, Witterung, Geologie usw.), ein weiterer Punkt, der das Verlangen nach stabilisierenden Methoden bekräftigt.
- Damit ein System nach dem Push-Prinzip gesteuert werden kann, muss man wissen, welche Leistungsfähigkeit die Produktion hat. Dies ist notwendig, da das Push-System entsprechend der Leistungsfähigkeit bzw. Kapazität Aufträge in das System einlastet. Umgekehrt funktioniert ein Pull-System, dass die Leistungsfähigkeit nicht prognostizieren muss, sondern die Einlastung anhand eines zuvor definierten maximalen Puffers steuert. Die Vorhersagegüte der Leistungsfähigkeit sinkt mit zunehmender in der Produktion vorhandener Dynamik. Hieraus kann abgeleitet werden, dass Pull-Systeme insbesondere für dynamische Produktionssysteme geeignet sind. Die Bauproduktion ist eine dynamische Produktion, was sie zur Anwendung eines Pull-Systems prädestiniert. In einer dynamischen Produktion ist das Vorgehen nach der CONWIP-Methode (vgl. Kopplungsvariante 6) aufgrund der besseren Anpassbarkeit und höheren Robustheit der Kanban-Methode vorzuziehen.
- Ein Pull-System ist dadurch gekennzeichnet, dass es a priori eine maximal zulässige Gesamtzahl an Zwischenprodukten definiert, die ein Vorgängerprozess im Vergleich zu seinem Nachfolgerprozess vorproduzieren darf (vgl. (Hopp & Spearman 2011)). Hierdurch ist ein weiterer Nebeneffekt, dass bei auftretenden Änderungen (z.B. induziert durch Änderungswünsche des Bauherren oder bei auftretenden Produktionsfehlern) tendenziell weniger sich bereits in Bearbeitung befindlicher Zwischenprodukte vorhanden sind, was dazu führt, dass das Pull-System flexibler bzgl. aufkommender Anpassungen ist, da der Änderungsaufwand sinkt.
- Anhand der Ergebnisse der Analyse der einzelnen Varianten ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Reduktion der Losgröße und die Reduktion der Variationskoeffizienten zu erheblichen Prozessverbesserungen führen. Hieraus folgt, dass diesen Maßnahmen eine besondere Bedeutung zukommen muss.
- Bisherige Anstrengungen fokussieren sich insbesondere darauf, die Produktion durch Entkopplung der einzelnen Produktionsprozesse robuster zu gestalten. Dies ist analog zu Kopplungsvariante 3 auf Tagesbasis. Produktionsaufträge werden nur freigegeben, wenn diese auch hundertprozentig in der dafür vorgesehenen Dauer fertiggestellt werden können. Hieraus ergeben sich die diskutierten Nachteile (vgl. Variante 3).

³⁷⁴ Gleiches gilt für Kombinationen unterschiedlicher Varianten, die zu einer Erhöhung des Erwartungswerts und einer Verringerung der Varianz der Prozessdauer oder umgekehrt führen.

6 Exemplarische Umsetzung von Lean Management im Erdbau

In Kapitel 5 wurde analysiert, welche Vorteile eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien hat. Des Weiteren wurde dargestellt, was bei einer Implementierung zu beachten ist. Die Ergebnisse führen zu der konkreten Fragestellung:

- Wie können diese Ansätze im Erdbau konkret umgesetzt werden?

Der exemplarischen Beantwortung dieser Frage widmet sich Kapitel 6. In Kapitel 6.1 wird erläutert, wie das Pull-Prinzip im Erdbau umgesetzt werden kann. Abschließend wird in Kapitel 6.2 dargestellt, wie eine Bauproduktionsplanung und -steuerung ganzheitlich ablaufen könnte.

6.1 Umsetzung des Pull-Prinzips

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel werden im Folgenden zwei sich ergänzende Bauproduktionssteuerungsmöglichkeiten vorgestellt.

In Kapitel 6.1.1 wird ein Pull-Mechanismus für Leerfahrzeuge vorgestellt. Ergänzend hierzu wird in Kapitel 6.1.2 vorgestellt, wie eine Steuerung von beladenen Transportfahrzeugen stattfinden kann. Beide Steuerungsmöglichkeiten bieten isoliert implementiert Vorteile, können aber auch gemeinsam umgesetzt werden. Wie eine ganzheitliche Steuerung umgesetzt werden kann, wird in Kapitel 6.1.3 diskutiert.

6.1.1 Zuordnung von Leerfahrzeugen

Die Analyse von Fallstudien hat ergeben, dass die Zwischenankunftszeiten der LKW an den Baggern sehr stark schwanken. Dieses Systemverhalten führt wiederum dazu, dass Bagger eine relativ hohe Wartezeit haben.

Das festgestellte Systemverhalten und die damit verbundenen Nachteile der hohen Bagger-Wartezeiten bringen die Fragestellung auf, wie man die operative Bauproduktionssteuerung besser koordinieren kann.

Der aus dem Lean Management bekannte Ansatz der Implementierung des Pull-Systems (vgl. Kapitel 2.3, 5.1.3 und 5.3) erscheint eine gute Möglichkeit für die operative Bauproduktionssteuerung. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Hypothese aufgestellt:

- Die Anwendung des Pull-Prinzips bei der LKW-Allokation der Leerfahrzeuge führt zu geringeren Systemschwankungen und einer höheren Systemauslastung als traditionelle Steuerungsmethoden.

Die Verifikation wird anhand einer diskreten Ereignis-Simulation durchgeführt (vgl. (Domschke & Drexl 2011)). Das simulierte System ist in Abbildung 6-1 dargestellt, der dargestellte Systemaufbau entspricht einer beobachteten Fallstudie.

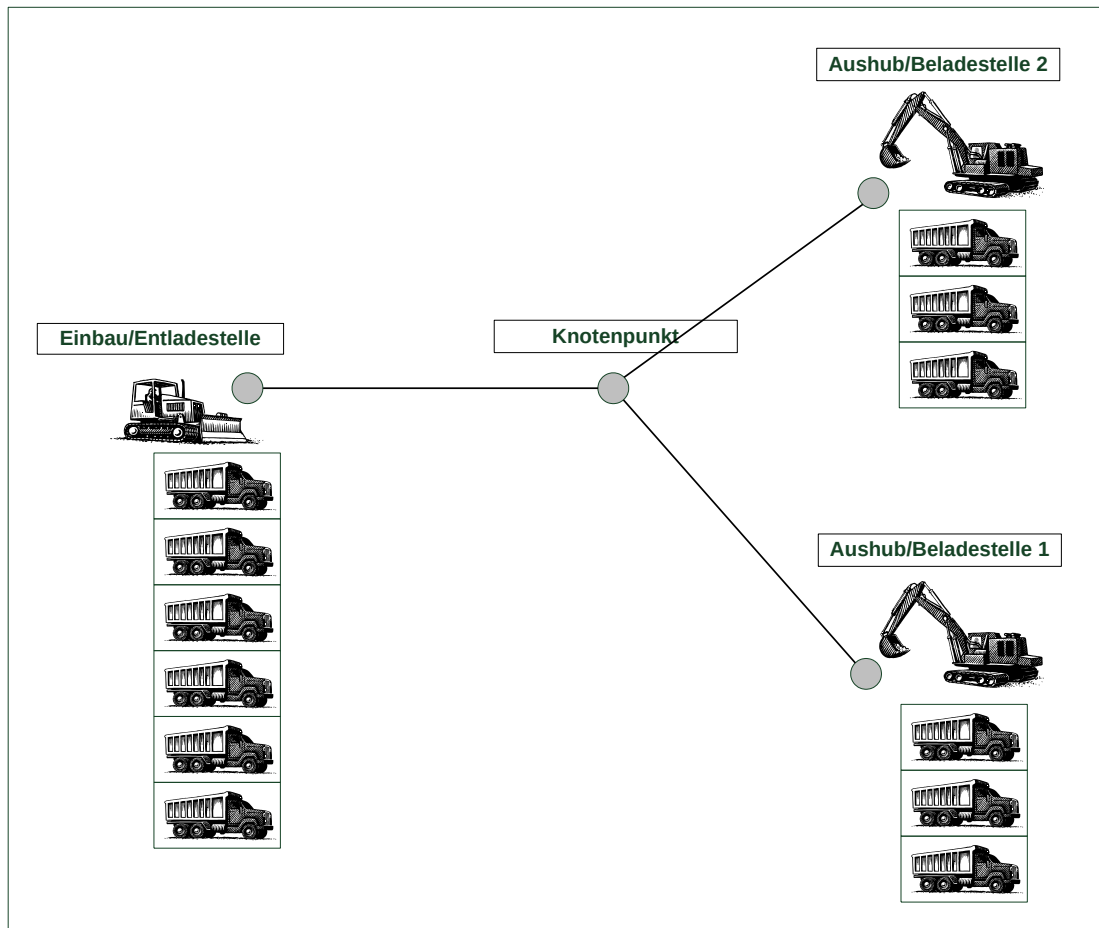


Abbildung 6-1: Simulationsaufbau

Für alle Prozesszeiten (Fahrzeiten, Beladezeiten und Entladezeiten) wird unterstellt, dass diese normalverteilt sind³⁷⁵. Besonders hohe oder niedrige Prozesszeiten wurden hierbei durch einen Selektionsalgorithmus ausgeschlossen^{376, 377}.

Die Steuerung der Transportfahrzeuge erfolgt in Variante 1 ohne Pull-Prinzip und jedem LKW wird ein konkreter Bagger zugewiesen (dies entspricht durchgeführten Beobachtungen an realen Baustellen). Bei Variante 1 wurden die Anzahl der LKW nach dem traditionellen Vorgehen bestimmt (vgl. (Gehbauer 2004) und (Girmscheid 2010c))³⁷⁸.

In Variante 2 wurde eine am Pull-Prinzip orientierte Systemsteuerung am Knotenpunkt eingesetzt. Die Anzahl an Transportfahrzeugen wurde aus Variante 1 übernommen. In Variante 2 erfolgt eine Zuteilung der Transportfahrzeuge zu einem Bagger anhand eines einfachen Zuteilungs-Algorithmus am

³⁷⁵ Gehbauer stellt in (Gehbauer 1974), fest, dass diese Vereinfachung ausreichend genau ist.

³⁷⁶ Da es unrealistisch ist, dass eine gewisse minimale Spielzeit unterschritten wird (sowohl bei den Fahrzeiten als auch bei den Beladezeiten), wurde die Normalverteilung linksseitig durch einen Minimalwert begrenzt, der nicht unterschritten werden kann. Die rechtsseitige Abgrenzung wurde deutlich höher gewählt (vgl. (Gehbauer 1974)).

³⁷⁷ Die Anzahl der Simulationsdurchläufe wurde anhand unterschiedlicher Probedurchläufe bestimmt. Es wurden 500 Simulationsdurchläufe pro Variante gewählt. Diese Anzahl gewährleistet eine ausreichende Genauigkeit der Simulationsergebnisse bei moderaten Simulationsdauern. Das System wurde im nichteingeschwungenen Zustand gestartet und die Messungen beinhalten somit die sog. Einschwingphase. Dies entspricht nach Ansicht des Autors durchaus der Realität, da bei Produktionsstart ein „leeres“ System vorliegt. Simuliert wurden jeweils 29000 Sekunden was ca. einem 8 Stundenarbeitstag entspricht.

³⁷⁸ Weitere Details hierzu befinden sich in Anhang 13.

Knotenpunkt statt. Der Algorithmus stellt fest, wie viele Transportfahrzeuge sich im jeweiligen Streckenabschnitt (Knotenpunkt → Beladestelle 1 oder Knotenpunkt → Beladestelle 2) befinden und allokiert die Transportfahrzeuge bei Unterschreitung eines zuvor definierten Grenzwerts. Ist der Grenzwert überschritten, warten die Transportfahrzeuge am Knotenpunkt. Die Wahl des Grenzwerts wurde anhand unterschiedlicher Simulationsdurchläufe bestimmt (Für Linie 1: Grenzwert=3 LKW; für Linie 2: Grenzwert=4 LKW). Des Weiteren ist durch den Zuteilungs-Algorithmus sichergestellt, dass die LKW priorisiert im Wechsel zugeordnet werden (d.h. zu Beginn Linie 1, dann Linie 2, dann Linie 1...), bis der jeweilige Grenzwert erreicht ist. Die Steuerungslogik ist Teil des Simulationscodes und in Anhang 9 unter „Kanbansteuerung“ zu finden.

Die detaillierte Darstellung der Simulationsergebnisse befindet sich in Anhang 10.

Die Simulationsergebnisse haben ergeben, dass Variante 2 im Vergleich zu Variante 1 eine durchschnittlich 3,2 % geringere Wartezeit bei den Baggern zur Folge hat. Dies erscheint zunächst eine geringe Reduktion zu sein. Dem ist zu entgegnen, dass eine durchschnittliche Verringerung der Mietdauer von, in diesem Fall: 21 LKW, 2 Baggern, zwei Planiertraupen im Einbaubereich, zugehörigen Reinigungspersonals zur Gewährleistung der Sauberkeit öffentlicher Straßen, zugehörigen Maschinen und Personal zur Instandsetzung der Baustraßen (eine Walze und ein Grader, die anteilig zur Baustraßeninstandsetzung eingesetzt wurden) und zugehöriges koordinierendes Personal sowie entsprechende Kraftstoffeinsparungen um insgesamt ca. 3,2 %³⁷⁹ einer erheblichen Einsparung entspricht.

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere die Schwankungen der Zwischenankunftszeiten und Zwischenabfahrtszeiten bei Variante 2 deutlich geringer ausfallen als bei Variante 1. Eine Verringerung der Schwankungen der Prozesszeiten entspricht einer gleichmäßigeren Auslastung der zugehörigen Prozesskette. Eine gleichmäßigere Auslastung bedeutet, dass Auslastungsspitzen und -täler abgefangen und gleichmäßiger verteilt werden. Dies hat weitere Folgen, die in der Simulation bisher nicht berücksichtigt wurden, z.B. kann in einer Phase, in der Spitzenleistungen abgerufen werden, die tatsächlich erreichte Leistung aufgrund von Überlastung sinken und in Phasen von Leistungstälern zusätzliche Verschwendung durch unkonzentriertes Arbeiten entstehen. Somit ist die erreichte Verbesserung deutlich weitreichender als die alleinige Abnahme der Baggerwartezeiten.

Sowohl für Variante 1 als auch für Variante 2 ist die Standardabweichung der Wartezeiten sehr gering im Verhältnis zum relativ hohen Mittelwert der Wartezeiten. Real auf Baustellen auftretende Schwankungen können deutlich höher sein. Dies liegt insbesondere an auftretenden Störungen (z.B. Witterungsänderungen, Maschinenausfall oder Änderungen der Arbeitsbedingungen z.B. beim Bagger durch Antreffen einer schwer zu lösenden Schicht). Diese Randbedingungen wurden in der Simulation nicht berücksichtigt, da das Ziel der Nachweis der Eignung einer am Pull-Prinzip orientierten LKW-Steuerung unter gleichbleibenden Randbedingungen war. Eine Beurteilung der Störungsanfälligkeit des am Pull-Prinzip orientierten Steuerungssystems ist nicht Teil dieser Beweisführung. Dennoch ist leicht nachvollziehbar, dass die vorgeschlagene Steuerung insbesondere beim Eintritt von Störungen zu Systemverbesserungen führt, da eine selbstständige und schnelle Reallokation der LKW stattfindet.

Die Ergebnisse verifizieren somit die aufgestellte Hypothese, dass die Anwendung des Pull-Prinzips bei der LKW-Allokation der Leerfahrzeuge zu geringeren Systemschwankungen und einer höheren Systemauslastung führt, als eine traditionelle Steuerung.

³⁷⁹ „ca.“ da nicht davon auszugehen ist, dass z.B. der komplette Kraftstoff eingespart werden kann.

6.1.2 Zuordnung von beladenen Transportfahrzeugen

Anhand der Ergebnisse aus Kapitel 5.3 wurde festgestellt, dass die Umsetzung des Pull-Prinzips nach der CONWIP-Methode gegenüber einer Steuerung nach dem Push-Prinzip deutliche Vorteile hat. Aus diesem Grund wird im Folgenden anhand einer fiktiven Bauproduktion (eine Erdbaustelle) genauer analysiert, ob eine Bauproduktionssteuerung anhand der CONWIP-Methode Vorteile gegenüber einer Steuerung anhand des Push-Prinzips besitzt und welche Vorteile dies sind.

Der Fokus der weiteren Ausführungen liegt auf der Produktionskette mit den Prozessen: „Laden&Lösen“, „Transportieren“ und „Verteilen“.

Die traditionelle Methode der Verknüpfung der Produktionsprozesse ist analog zur Umsetzung des Push-Prinzips. In Abbildung 6-2 ist das traditionelle Vorgehen dargestellt.

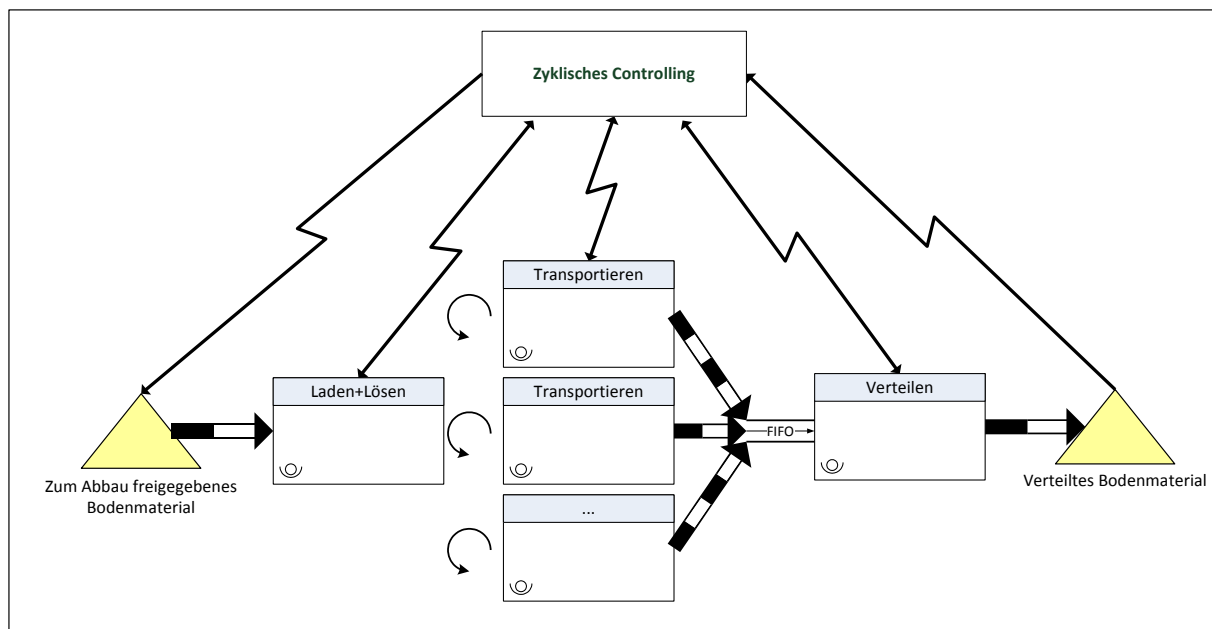


Abbildung 6-2: Push-Prinzip bei traditioneller Bauproduktion

Die Produktionsprozesse „Laden+Lösen“, „Transportieren“ und „Verteilen“ finden sequenziell nacheinander statt. Der Produktionsprozess „Transportieren“ pullt den Produktionsprozess „Laden+Lösen“, d.h. „Laden+Lösen“ kann nur stattfinden, wenn „Transportieren“ pullt. Sobald das Material transportiert ist, wird es abgeladen und gemäß dem Prinzip „first-in-first-out“ (FIFO) verteilt.

Die Bauproduktionsplanung gibt große, zusammenhängende Aufträge zum Bearbeiten frei (in Abbildung 6-2 dargestellt durch „Zum Abbau freigegebenes Bodenmaterial“). Die Produktionsprozesse „Laden&Lösen“, „Transportieren“ und „Verteilen“ bearbeiten den freigegebenen Auftrag³⁸⁰. Ein (groß)zyklisches, durch die Bauleitung stattfindendes, Controlling analysiert, ob die Produktionsprozesse die geplante Leistung erbringen. Ist dies nicht der Fall, werden Anpassungen am Produktionssystem vorgenommen. Ein Eingriff bei zu schneller Produktion findet häufig nicht statt, da das generelle Ziel die Erfüllung der aus den Planunterlagen (insb. des Terminplans) resultierenden Vorgaben ist.

³⁸⁰ In dem dargestellten Beispiel wird davon ausgegangen, dass das zum Abbau anstehende Bodenmaterial direkt im Einbaubereich verwendet werden kann und, dass kein extern angeliefertes Material notwendig ist.

Dem gegenüber steht die Umsetzung des Pull-Prinzips durch die CONWIP-Methode. In Abbildung 6-3 ist das entsprechende System dargestellt.

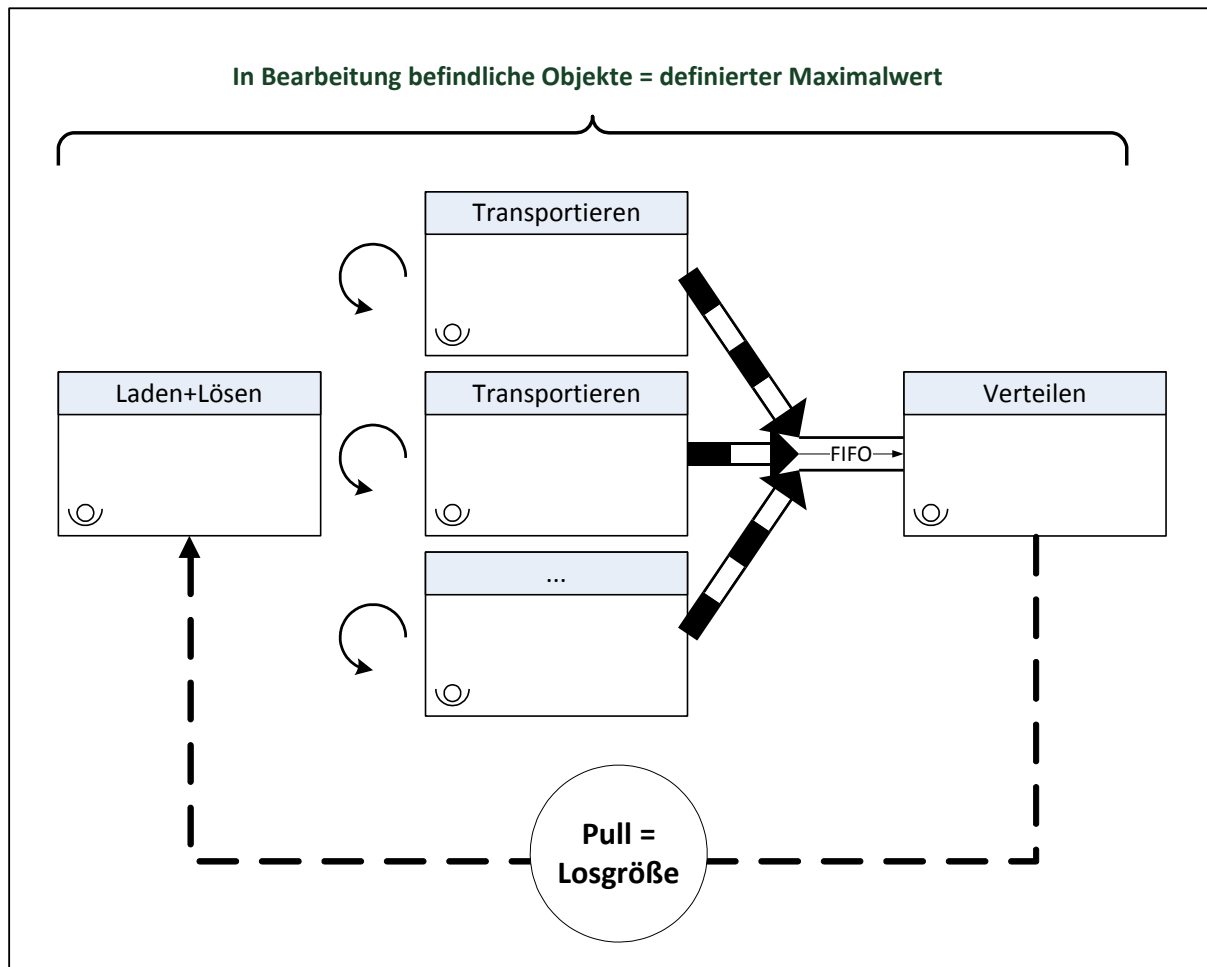


Abbildung 6-3: Umsetzung des Pull-Prinzips durch die CONWIP-Methode

Eine bestimmte maximale Anzahl der in Bearbeitung befindlichen Objekte wird festgelegt (der sog. CONWIP). Zu Beginn wird das System gemäß des festgelegten CONWIP-Wertes eingelastet. Im Gegensatz zu einer Steuerung nach dem Push-Prinzip, arbeitet der Produktionsprozess „Laden&Lösen“ in steter Abhängigkeit vom Fortschritt des Prozesses „Verteilen“. D.h. „Laden&Lösen“ produziert nur, wenn Material von „Verteilen“ benötigt wird. Wenn der letzte Produktionsprozess eine Losgröße fertiggestellt hat und der zuvor definierte maximale CONWIP-Wert unterschritten ist, erfolgt über den Pull ein Freigabesignal an den ersten Produktionsprozess. Das Signal bezieht sich immer auf eine bestimmte zu produzierende Menge (in Abbildung 6-3 entspricht diese einer Losgröße). Die Arbeitsobjekte müssen bei dieser Steuerung keinesfalls identisch sein. Falls es sich um unterschiedliche Arbeitsobjekte handelt, werden mit jedem Pull-Signal Aufträge in das System eingelastet, die einen möglichst identischen Arbeitsumfang (bezogen auf die einzelnen Produktionsprozesse) besitzen.

Generell wird ein Produktionssystem in der Planung für eine bestimmte Tätigkeit dimensioniert. Zur Dimensionierung sind bestimmte Annahmen bzgl. der Leistungsfähigkeit der einzelnen Prozesse notwendig. Die Größen, für die das Produktionssystem in der Planung dimensioniert wird, charakterisieren den „Basis-Fall“. Aufgrund von unterschiedlichen Einflüssen (vgl. Kapitel 3.1) entstehen während der Produktion Abweichungen zu diesem „Basis-Fall“. Für die obig vorgestellte Prozesskette sind dabei insbesondere folgende Fälle von Bedeutung:

- **Basis-Fall** : Ausgeglichenes Produktionssystem
 - **Verschlechterung-Fall 1:** „Lösen&Laden“-Prozess arbeitet langsamer
 - **Verschlechterung-Fall 2:** „Transportieren“-Prozess arbeitet langsamer
 - **Verschlechterung-Fall 3:** „Verteilen“-Prozess arbeitet langsamer

 - **Verbesserung-Fall 1:** „Lösen&Laden“-Prozess arbeitet schneller
 - **Verbesserung-Fall 2:** „Transportieren“-Prozess arbeitet schneller
 - **Verbesserung-Fall 3:** „Verteilen“-Prozess arbeitet schneller

Für die einzelnen Fälle wären beispielhafte Gründe:

- Basis-Fall: System verhält sich wie in der Planung angenommen
 - Verschlechterung-Fall 1: In einem bestimmtem Abschnitt befindet sich schwierig zu lösendes Material
 - Verschlechterung-Fall 2: Die Baustraßen sind aufgrund eines starken, kurzen Regenschauers schlecht befahrbar
 - Verschlechterung-Fall 3: Eine kompliziertere zu erstellende Geometrie in einem bestimmten Abschnitt

 - Verbesserung Fall 1: In einem bestimmtem Abschnitt befindet sich leichter zu lösendes Material
 - Verbesserung Fall 2: Behinderungen auf der Transportstrecke verschwinden temporär
 - Verbesserung Fall 3: Neueingetzter Baumaschinenführer leistet mehr

Die exemplarischen Beispiele machen deutlich, dass alle Fälle vorkommen können. Zu beantworten bleibt, welche Konsequenzen der jeweilige Fall für das Push- bzw. Pull-Prinzip hat. Deutlich zu erwähnen ist, dass auch mehrere Fälle gleichzeitig eintreffen können (z.B. alle Verschlechterungsfälle gleichzeitig oder Verschlechterung-Fall 1 und Verbesserung-Fall 3). Der gleichzeitige Eintritt mehrerer Fälle wurde nicht analysiert, um nicht unnötig viele Varianten zu analysieren. Die Ergebnisse der einzelnen Fälle geben bereits ausreichend Aufschluss darüber, welche Wirkung das jeweilige Steuerungsprinzip für den jeweiligen Fall hat. Real befindet ein Produktionssystem sich abwechselnd in den einzelnen Fällen. Je nachdem, welche Prozessdauern unter den gegebenen Produktionszuständen realisierbar sind, kommen unterschiedliche System-Engpässe vor. Da es sehr stark vom betrachteten Produktionssystem und der Produktionsaufgabe abhängt, wann welche Prozessdauer realisierbar ist (d.h. wann welcher Fall auftritt), wird jeder Fall isoliert betrachtet simuliert und die Konsequenzen des jeweiligen Steuerungsprinzips (d.h. Push oder Pull) dargestellt.

Die Vorteile von KVP bei der Umsetzung des Pull-Prinzips wurden bisher beabsichtigt ausgeblendet. Wie bereits in Kapitel 5.1.3.3 erläutert, bestehen zusätzliche Synergie-Effekte zwischen der Implementierung des Pull-Prinzips und KVP. Durch die Limitierung der in Bearbeitung befindlichen Objekte (d.h. Zwischenprodukte oder Bestände) wird das System häufig angehalten bzw. blockiert, wenn das System nicht gleichmäßig arbeitet. Die Gründe der Blockierung sind aufgrund der geringen Zeit, die zwischen Auftreten der Ursache und Wirkung vergeht, besser identifizierbar, als bei anderen Steuerungsmethoden, die sehr häufig einen deutlich größeren Steuerungszyklus besitzen. Ein Beispiel hierfür ist das Push-Prinzip, das unregelmäßige, seltene Steuerungseingriffe vornimmt und aufgrund des langen zeitlichen Versatzes zwischen Auftreten der Ursache und Wirkung die Identifizierung von Problemursachen erschwert. Des Weiteren fehlen innerhalb des Push-Systems klare Regeln, an denen der Systemzustand bewertet werden kann. Die Wirkung von KVP-Maßnahmen wird innerhalb der Simulation durch eine Reduktion der Mittelwert und Standardabweichung der Prozessdauern dargestellt.

Um die Konsequenzen der Produktion in allen Fällen beurteilen zu können, werden alle Fälle anhand einer Simulation analysiert. Der Simulation liegen einige Annahmen zugrunde, diese sind insbesondere:

- Die Produktionsprozesse „Laden&Lösen“ und „Transportieren“ arbeiten bei Umsetzung des Push-Prinzips unabhängig von der tatsächlichen Kapazität des „Verteilen“-Prozesses. Damit dies möglich ist, müssen die Transportfahrzeuge angeliefertes Material dort entladen, wo die Fahrer einen zukünftigen Materialbedarf vermuten. Dieses Vorgehen kann jedoch zu negative Konsequenzen im Einbaubereich führen, da das Material dort abgeladen wird, wo die Fahrer der Transportfahrzeuge vermuten, dass es im weiteren Verlauf gebraucht wird und nicht dort, wo der Verteilen-Prozess es tatsächlich benötigt (was insbesondere bei einer größeren Anzahl an abgeladenen Ladungen zum Problem werden kann, da der Fahrer des Transportfahrzeuges nicht genau weiß, wo das Material benötigt wird). Wenn Material an für den „Verteilen“-Prozess ungünstigen Stellen abgeladen wird, wird dieser aufgrund noch längerer Prozesszeiten langsamer und der Fertigstellungszeitpunkt verspätet sich (vgl. den beschriebenen Zusammenhang zwischen Abladepunkt und Leistungsfähigkeit des Dozers in Kapitel 5.1.1). Wie bereits erwähnt, regelt das System bei Umsetzung des Push-Prinzips dies erst, wenn bereits zu viele Zwischenprodukte erstellt wurden - und der Bauleiter, Polier oder weitere Projektbeteiligte dies merken und sich bzgl. der Konsequenzen im Klaren sind.
- Es existiert ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Zwischenprodukten zwischen „Transportieren“ und „Verteilen“ und der Steigerung des Mittelwerts und der Standardabweichung der Prozessdauer von „Verteilen“. Dies resultiert aus dem oben beschrieben Zusammenhang, dass die Fahrer der Transportfahrzeuge das Material dort abladen, wo sie den späteren Bedarf des „Verteilen“-Prozesses vermuten und, dass dieser nicht immer mit dem tatsächlichen Bedarf des „Verteilen“-Prozesses übereinstimmt.
- Für den „Transportieren“-Prozess wird angenommen, dass, sobald ein hoher Bestand an Zwischenprodukten im System ist, höhere und stärker schwankende Fahrzeiten auftreten. Dieser Fall tritt insbesondere auf, wenn der „Verteilen“-Prozess der Engpass ist.
 - Dies resultiert daher, dass die Fahrer den Zustand, dass der „Verteilen“-Prozess der Engpass ist, erkennen und aufgrund von mangelndem Druck und mangelnder Abnahme seitens des „Verteilen“-Prozesses langsamer Arbeiten³⁸¹.
- Sollte ein Produktionsprozess früher als die übrigen Prozesse den Fertigungsauftrag beenden, hat dieser den identischen Fertigstellungstermin wie die übrigen Produktionsprozesse.
 - Dies resultiert aus der Annahme, dass die Produktionsprozesse nur so schnell wie der jeweilige Engpass sein können.
 - Eine weitere Annahme hierbei ist, dass die in Kapitel 3.3 erwähnten Transaktionskosten für eine neue Allokierung der jeweiligen Baumaschine/n so hoch sind, dass sich ein Wechsel einer temporär freiwerdenden Baumaschine nicht rentiert³⁸².
 - Des Weiteren hat eine häufige Reallokation von Bauproduktionsfaktoren erhebliche Nachteile in Bezug auf die Transparenz und die Planbarkeit des Produktionssystems.

³⁸¹ Diese Annahme ist durchaus realistisch, da sobald sich eine gewisse Anzahl an abgekipptem und unverteilt Material am „Verteilen“-Prozess angesammelt hat, ein schnellerer Antransport von neuem Material zu keiner Beschleunigung führt. Des Weiteren wird es kaum eine Baustelle geben bei der die Bauarbeiter gar keine interne und autonome Regulierung vornehmen.

³⁸² Dies ist durchaus realistisch, da ein Bagger, eine Planierraupe oder ein Transportfahrzeug bei früherer Fertigstellung selten eine andere Tätigkeit aufnehmen kann als die zugeteilte Produktionskette. Z.B. werden die Transportfahrzeuge oder der/die Bagger keine neue Tätigkeit aufnehmen, wenn sie eine Stunde früher fertig werden, als der/die Planierraupe/n. In der Regel wird die freiwerdende Zeit für andere Tätigkeiten wie Maschineninspektion oder -pflege genutzt. Des Weiteren reguliert sich der Produktionsprozess bis zu einem gewissen Grad selbst so, dass sich nicht unendliche Bestände aufbauen (z.B. durch Eingriff des Bauleiters).

- Die Prozessdauern sind annähernd normalverteilt.

Der Aufbau der Simulation entspricht Abbildung 6-2 bzw. Abbildung 6-3. Im Folgenden werden die einzelnen Fälle simuliert und die Ergebnisse kommentiert. Die Simulation wurde für unterschiedliche Variationskoeffizienten durchgeführt.

Das Ziel der Simulationen ist, anhand von quantitativen Ergebnissen qualitativ darüber entscheiden zu können, ob das Pull oder das Push-Prinzip zu einem besseren Produktionsverhalten führt. Der verwendete Simulationscode befindet sich in Anhang 12.

Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Eine detaillierte Diskussion der Simulationsergebnisse befindet sich in Anhang 13. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse konsolidiert erläutert.

Die Ergebnisse des „Basis-Falls“, der gleichzeitig als Planungsfall angesehen werden kann, zeigen, dass die Pull-Steuerung gegenüber der Push-Steuerung eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit und eine deutlich geringere Standardabweichung besitzt. Das Ausmaß der Leistungssteigerung (bis zu ca. 34 %, vgl. Anhang 13) und der Reduktion der Standardabweichung (bis zu 95% Reduktion, vgl. Anhang 13) ist insbesondere vom Variationskoeffizienten der Prozessdauern abhängig.

Die „Verschlechterung“ der Produktionsprozesse „Laden&Lösen“ und „Transportieren“ haben aufgrund der Abhängigkeit des Baggers auf Transportfahrzeuge den nahezu identischen Effekt auf die Prozesskette. Beide Fälle führen dazu, dass ein Engpass am Systemanfang entsteht. Je stärker dieser Engpass ausgeprägt ist, desto stärker bestimmt er den Ablauf der Produktion. Insbesondere verhindert ein Engpass am Beginn der Produktion - unabhängig vom Steuerungs-Prinzip - das Ansammeln von Beständen bzw. Zwischenprodukten innerhalb der Produktion. Der Engpass bestimmt somit das Produktionstempo. Damit dies möglich ist, muss der Engpass jedoch ausreichend ausgeprägt sein, kleinere Abweichungen reichen im Mittel nicht aus. Bei kleineren Abweichungen zeigen sich die identischen Effekte wie beim Basis-Fall.

Dem gegenüber führt eine Verschlechterung des Produktionsprozesses „Verteilen“ zu einer Verstärkung der für den „Basis-Fall“ erläuterten Zusammenhänge. Der Engpass am Ende des Produktionssystems führt im Falle einer Push-Steuerung dazu, dass sich Bestände bzw. Zwischenprodukte schneller ansammeln und somit schneller zum „Kollabieren“ des Produktionssystems führen - insofern zuvor keine Maßnahmen zur Korrektur vorgenommen wurden.

Neben den Verschlechterungsfällen wurde analysiert, wie sich das Produktionssystem unter der Push- bzw. Pull-Steuerung bei Verbesserungen gegenüber dem Planungszustand (bzw. Basis-Fall) verhält.

Der erste Verbesserungsfall hat gezeigt, dass eine Steigerung der Leistungsfähigkeit des Prozesses „Laden&Lösen“ im Fall einer Push-Steuerung zu einer Verschlechterung der Produktion führt. Für den Fall der Pull-Steuerung spielt die Steigerung hingegen kaum eine Rolle. Identische Ergebnisse folgen aus einer Verbesserung des Prozesses „Transportieren“. Ursächlich für die Verschlechterung ist eine Zunahme des Engpass beim „Verteilen“ Prozess.

Für den Fall einer Beschleunigung des Prozesses „Verteilen“ ist zunächst für beide Steuerungsprinzipien festzustellen, dass eine Verbesserung eintritt. Auch die Ergebnisse der Produktion sind sehr ähnlich, abgesehen von einer erhöhten Standardabweichung der Fertigstellungszeiten im Falle der Push-Steuerung.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Pull-Steuerung in allen Fällen zu einem besseren Produktionsverhalten führt. Somit kann abschließend festgestellt werden, dass das Pull-Prinzip dem Push-Prinzip im Erdbau deutlich überlegen ist.

Diese Aussagen wurden ungeachtet der bereits erwähnten Synergie-Effekte zwischen der Umsetzung des Pull-Prinzips und KVP getroffen (vgl. Kapitel 5.1.3.3). Unter der Annahme, dass das Pull-Prinzip im Zusammenhang mit KVP zu einer Reduktion der Variationskoeffizienten beitragen kann, hat das Pull-Prinzip noch deutlichere Vorteile. Die in den einzelnen Fällen dargestellten Simulationsergebnisse machen deutlich, welche Rolle der Variationskoeffizient in der Produktion spielt (vgl. Anhang 13). Eine Reduktion der Variationskoeffizienten der Produktionsprozesse hat eine erhebliche Verbesserung der Produktion zur Folge. Durch die starke Verankerung des Pull-Prinzips mit dem KVP-Gedanken ist die Chance einer Reduktion des Variationskoeffizienten beim Pull-Prinzip deutlich höher als beim Push-Prinzip einzustufen. Die durch eine Implementierung eines Pull-Systems existierenden Synergieeffekte in Bezug auf eine kontinuierliche Prozessverbesserung lassen sich nicht anhand einer Simulation nachweisen. Dies resultiert daher, dass die vorherrschenden Wirkungsmechanismen nur sehr rudimentär erforscht sind und somit auch nicht in einem Simulationsmodell abbildbar sind³⁸³. Die Existenz dieser Synergieeffekte lässt sich darauf zurückführen, dass Pull-Systeme langfristig nur in Produktionsumfelder etablierbar sind, die durch eine hohe inhärente Qualität gekennzeichnet sind (vgl. (Hopp & Spearman 2011)). Der Qualitätsbegriff referenziert in diesem Zusammenhang zum einen auf die Vermeidung von Maschinenausfällen und Nacharbeit, zum anderen aber insbesondere auch darauf, dass durch KVP-Maßnahmen der Erwartungswert und die Standardabweichung von Prozessdauern kontinuierlich gesenkt werden. Der hohe Qualitätsanspruch des CONWIP-Systems resultiert aus der Begrenzung des Puffers. Treten z.B. Maschinenausfälle auf, existieren keine ausreichenden Puffer, die als Überbrückung des Ausfalls dienen können. Durch die Limitierung des CONWIP wird anhand der Ansammlung der in Arbeit befindlichen Objekte sehr transparent, bei welchem Produktionsprozess es sich um einen Engpass handelt. Dies bietet enorme Vorteile, wenn innerhalb der Bauproduktion entschieden werden muss, wo zusätzliche Kapazitäten allokiert werden müssen. Des Weiteren werden die Auswirkungen einer nicht optimalen Produktion (d.h. hohe Varianzen und Mittelwerte usw.) anhand der hieraus resultierenden niedrigen Auslastungen direkt sichtbar. Dies steigert den Anreiz, sich innerhalb der Produktion mit Problemen auseinanderzusetzen und die Problemursache zu beseitigen (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Potentiale von KVP lassen sich anhand der Simulationsergebnisse beurteilen, indem im jeweils vorliegenden Fall von einer Verringerung des Variationskoeffizienten ausgegangen wird (vgl. hierzu die dargestellten Simulationsergebnisse in Anhang 13).

Auffällig sind bei Umsetzung des Push-Prinzips die hohen Standardabweichungen der Fertigstellungszeitpunkte. Bei Umsetzung des Pull-Prinzips sind diese deutlich geringer ausgeprägt. Des Weiteren schwanken die Mittelwerte der Fertigstellungsdauern für die einzelnen Fallunterscheidungen nicht so gravierend wie beim Push-Prinzip. Hieraus folgt, dass bei der Umsetzung des Pull-Prinzips das Produktionssystem deutlich einfacher bzgl. zu erstellender Prognosen für Planungen etc. ist. Des Weiteren können durch diese Vergleichmäßigung die existierenden Folgeprozesse besser ausgerichtet werden. Aufgrund der Ergebnisse von Kapitel 5.1.2 folgt außerdem, dass bei der Dimensionierung der Folgeprozesse im Fall von geringeren Schwankungen kleinere Dimensionierungen möglich sind. Dies hat neben einer Reduktion der Produktionszeiten auch erhebliche Kosteneinsparungen zur Folge.

Der wesentlichste Synergieeffekt bei der Einführung eines Pull-Prinzips ist allerdings, dass das Systemverhalten kontrollierbar wird. Dies gilt sowohl für den Regelablauf als auch für Störungen. Wird die Produktion durch ein Push-System gesteuert, findet ab der Auftragserteilung keinerlei Steuerung mehr statt - bis ein neuer Reglungszyklus durchlaufen wird. Jeder Produktionsprozess arbeitet ohne

³⁸³ D.h. es ist z.B. ungeklärt zu welchem Zeitpunkt ein Synergieeffekt eintritt.

Abstimmung mit den anderen Produktionsprozessen isoliert. Bei einer Produktionssteuerung anhand des Pull-Prinzips findet hingegen ein kontinuierlicher Abgleich zwischen den Produktionsprozessen statt. Da die Produktionsprozesse über die Steuerungslogik miteinander verbunden sind, besteht ein wesentlicher Anreiz, bei aufkommenden Problemen zu kooperieren. Kooperieren bedeutet hierbei insbesondere, dass die individuellen Interessen der einzelnen Produktionsprozesse den Interessen des Gesamtprozesses untergeordnet werden (d.h. es nützt nichts, wenn Abschnitte eines Produktionsprozesses besonders effizient arbeiten, da diese über das existierende CONWIP-Limit direkt an die Effizienz der anderen Produktionsprozesse gekoppelt sind).

6.1.3 Der Zwei-Wege-Pull

Existieren sowohl mehrere Einbau- als auch Aushubbereiche, kann eine gleichzeitige Steuerung der leeren und beladenen Transportfahrzeuge erfolgen. In Abbildung 6-4 ist dieses „Zwei-Wege-Pull-System“ dargestellt. Der jeweilige Prozess „pullt“ auf einen existierenden Knotenpunkt. Eine weitere Möglichkeit, ist – insbesondere falls dieser Knotenpunkt nicht in einer ausgeprägten Form existiert –, dass das Pull-Signal direkt an die jeweiligen Prozesse erfolgt (diese Variante ist in Abbildung 6-5 dargestellt).

Der „Laden&Lösen“-Prozess „pullt“ Leerfahrzeuge vom Knotenpunkt bzw. vom „Verteilen“-Prozess. Umgekehrt „pullt“ der „Verteilen“-Prozess beladene Transportfahrzeuge vom Knotenpunkt bzw. vom „Laden&Lösen“-Prozess.

Da mehrere Prozesse in diesem Fall auf die identischen Ressourcen zugreifen (beide „Verteilen“-Prozesse greifen auf die Ressource „beladene Fahrzeuge“ zu und beide „Laden&Lösen“-Prozesse greifen auf die Ressource „Leerfahrzeuge“ zu – dies gilt für das in Abbildung 6-4 bzw. Abbildung 6-5 dargestellte Beispiel), ist es notwendig, einen Aufteilungsalgorithmus einzuführen, der darüber entscheidet, welche Ressource von welchem Prozess gepullt werden kann³⁸⁴.

Aufgrund der unterschiedlichen Schwankungen der Fahrzeiten - sowohl der Leerfahrzeuge als auch der beladenen Fahrzeuge - ergeben sich hieraus weitere Vorteile. Da die Wahrscheinlichkeit, dass auf beiden Fahrstrecken gleichzeitig lange Fahrzeiten auftreten werden, geringer ist, als bei jeder separaten Fahrbahn, können unter Umständen Transportfahrzeuge eingespart werden.

Damit diese Realisierung des „Zwei-Wege-Pulls“ möglich ist, müssen jedoch geringe Transaktionskosten (vgl. Kapitel 3.3) vorliegen. Diese sind dann gegeben, wenn ein Wechsel der Transportfahrzeuge von einer Streckenführung zwischen Aushub und Einbau zu einer anderen Streckenführung nicht sehr aufwendig ist.

Die Pull-Signal-Übermittlung kann in diesem System nur digital erfolgen. Des Weiteren müssen die Fahrer alle Streckenführungen kennen - alternativ wäre die Installation eines baustelleninternen Navigationssystems möglich, das die Transportfahrzeuge zu den jeweiligen Zielen leitet.

Sowohl bei einem Pull auf einen Knotenpunkt, als auch bei einem Pull auf die jeweiligen Prozesse ist darauf zu achten, einen geeigneten Wert für die CONWIP-Limitierung zu bestimmen. Da es sich um ein komplexes System handelt, kann dies nur durch den Einsatz einer geeigneten Simulation erfolgen.

Das hier vorgestellte Zwei-Wege-Pull-System hat insbesondere Vorteile, wenn die Leistungsfähigkeiten der einzelnen Produktionsprozesse schwanken, da die Steuerung je nach real vorhandenem Bedarf eine

³⁸⁴ Im einfachsten Fall könnte diese Regel z.B. sein: Abwechselnder Zugriff auf die Ressourcen.

Zuordnung der Fahrzeuge - sowohl leerer als auch beladener - vornimmt. Bei länger vorhandenem Leistungsabfall ist es ggf. notwendig, eine Anpassung der CONWIP-Limitierung vorzunehmen.

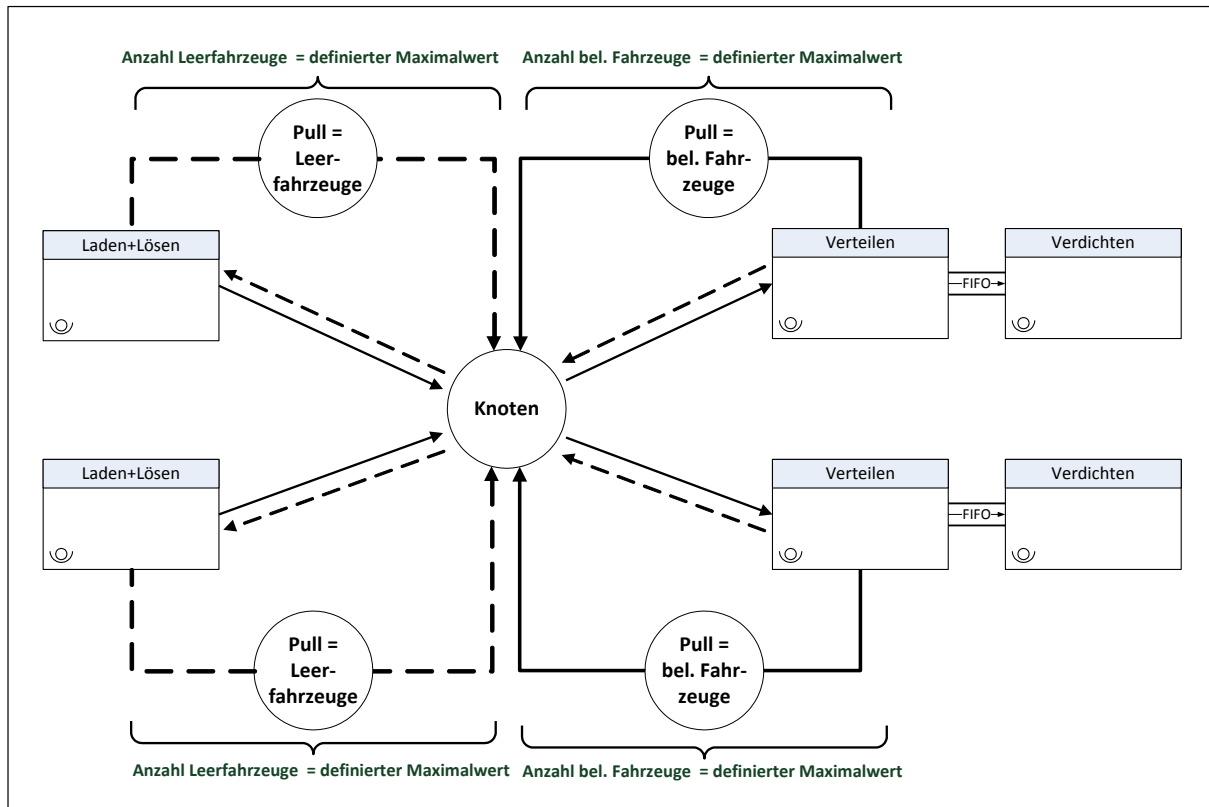


Abbildung 6-4: : Das Zwei-Wege-Pull-System – Pull auf Knoten

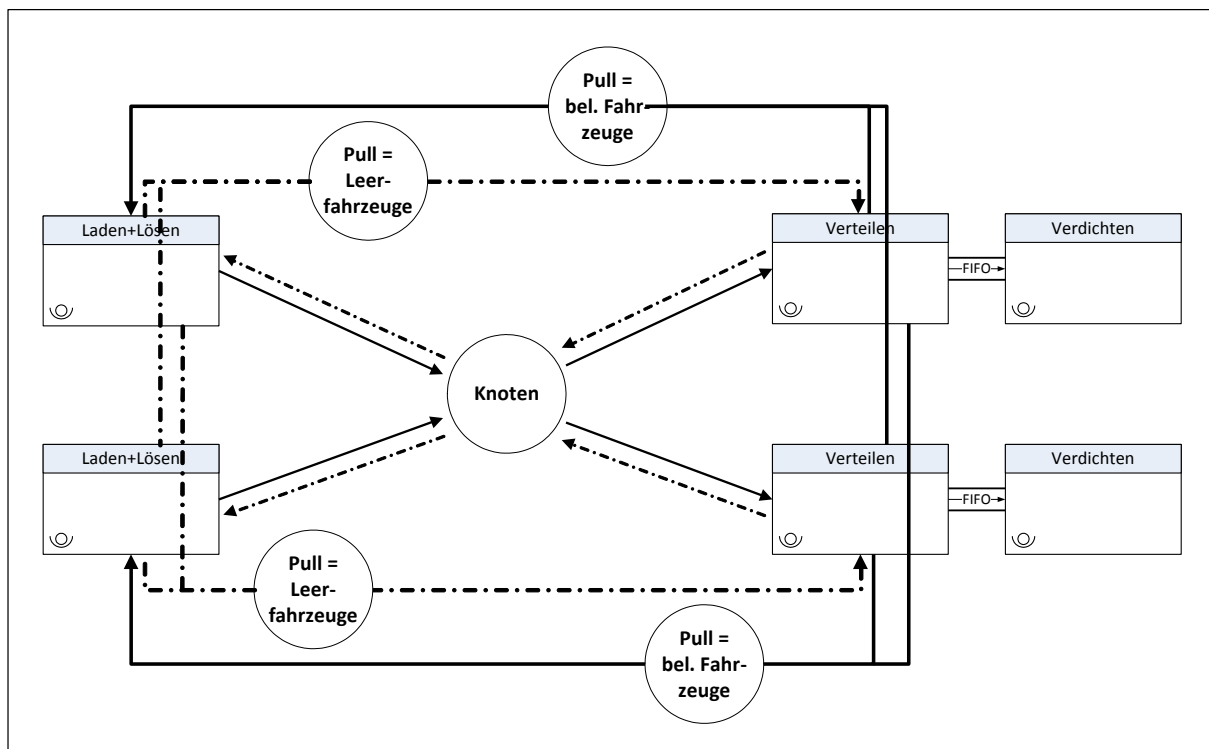


Abbildung 6-5: Das Zwei-Wege-Pull-System – Pull auf Prozesse

6.2 Exemplarischer Ablauf einer Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements

Abschließend stellt sich die Frage, wie eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements ganzheitlich ablaufen kann und wie sie sich in bereits bestehende Abläufe integriert. Dieses Kapitel hat hierbei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, Ziel ist es, darzustellen, wie die in den vorherigen Kapiteln erläuterten Sachverhalte in einen Gesamtablauf überführt werden können. In Abbildung 6-6 ist dargestellt, wie ein solcher Ablauf stattfinden könnte. Der in Abbildung 6-6 dargestellte Ablauf orientiert sich sehr stark am Ablauf des Last Planner Systems (LPS) (vgl. Kapitel 2.4.5). Im Folgenden wird genauer auf die einzelnen Punkte eingegangen³⁸⁵.

Grundsätzlich ist zunächst zu erwähnen, dass die Bauproduktionsplanung und -steuerung insbesondere zur jeweils vorherrschenden Unternehmenskultur passen muss. Eine Umstellung der Bauproduktionsplanung und -steuerung auf einen neuen Ablauf ist nicht ohne weiteres möglich und bedarf eines gezielten Changemanagements. Insofern handelt es sich bei den folgenden Ausführungen um generische Überlegungen, die auf den jeweiligen Einzelfall individuell angepasst werden müssen.

Die Bauproduktionsplanung und -steuerung beginnt mit der Eruierung der Wünsche des Bauherren und einer Meilensteinplanung. Je nach Bauherr kann es auch der Fall sein, dass dieser bereits eine Rahmenterminplanung inklusive des ausformulierten - vorläufigen - Bausolls bei Beauftragung vorweisen kann. Ist dies nicht der Fall, muss gemeinsam eine Grobplanung durchgeführt werden, die ermittelt, wann welcher Meilenstein abgeschlossen werden soll. Hierzu sind erste Gedanken bzgl. des Bedarfs an Bauproduktionsfaktoren notwendig. Werden den Dauern zwischen Meilensteinen vorläufige Kapazitäten in Form von Bauproduktionsfaktoren zugewiesen, entsteht nach weiterer Detaillierung und Ausdifferenzierung ein Rahmenterminplan. Diese Schritte umfassen mehrere Iterationen. Das bisher beschriebene Vorgehen entspricht dem traditionellen Vorgehen bei der Bauproduktionsplanung und -steuerung.

Das LPS ist dadurch gekennzeichnet, dass es durch die Integration der wesentlichen Beteiligten und ein stringentes Vorgehen die kontinuierliche Detaillierung der Planung vornimmt. Ein wesentliches Ziel in der Bauproduktionsplanung im Lean Management ist die Reduktion von Variabilität bei gleichzeitiger Reduktion der Erwartungswerte (vgl. 5.2). Die in den Kapiteln 5 und 6 dargestellten Sachverhalte müssen dabei Inhalt der Bauproduktionsplanung und -steuerung werden. Entscheidungen innerhalb der Bauproduktionsplanung und -steuerung werden nach der Prämisse getroffen, dass das Ziel ein möglichst optimaler Gesamtablauf und nicht die Optimierung einzelner Teilabschnitte ist.

Die in Abbildung 6-6 anhand der rückwertig orientierten Pfeile dargestellten Feedbackschleifen verdeutlichen die starke Vernetzung der einzelnen Prozesse innerhalb der Bauproduktionsplanung und -steuerung. Obwohl es sich hierbei um eine stark vereinfachte Darstellung handelt, wird ersichtlich, wie kompliziert das Zusammenspiel der einzelnen Prozesse ist. Alle Prozesse sind netzwerkartig miteinander verknüpft.

³⁸⁵ Es wird an dieser Stelle darauf verzichtet auf die einzelnen Phasen des LPS genauer einzugehen. Für nähere Informationen siehe Kapitel 2.4.5 und die dort aufgeführten Quellenangaben.

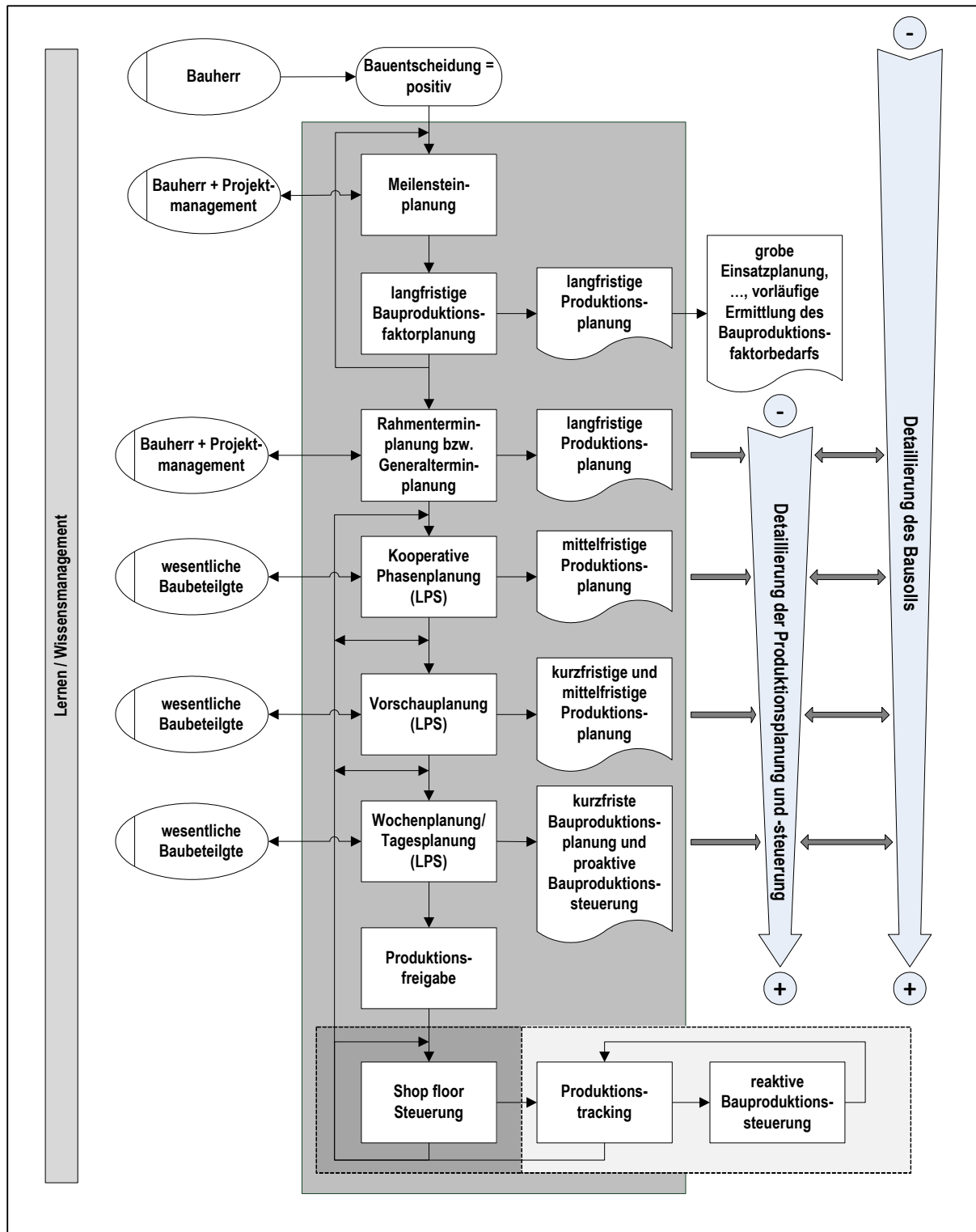


Abbildung 6-6: Ablauf einer Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements

Je nach Flexibilität der betrachteten Produktionsprozesse kann die genauere Bestimmung der CONWIP-Limitierung und der Taktung innerhalb von der kooperativen Phasenplanung oder Vorschauplanung erfolgen. Bei der Entscheidung, wann die Bestimmung der CONWIP-Limitierung stattfindet, spielt insbesondere der notwendige Planungsvorlauf eine Rolle (z.B. für die Beschaffung von Materialien, Maschinen oder Personal).

Ein wesentliches Problem bei Pull-Systemen ist der Mangel, Plandaten in die Produktionsplanung und -steuerung integrieren zu können. In einem komplett statischen Produktionssystem ist dies nicht so gravierend, wie in einem dynamischen Produktionssystem - wie dem Bauwesen. Ohne die Integration von Plandaten (wie Zwischentermine, Fertigstellungstermine usw.) fertigen Pull-Systeme unabhängig von einer bekannten Planung, sobald das Pull-Signal ausgelöst wird. Die Bauproduktion ist dadurch gekennzeichnet, dass eine relativ detaillierte Planung vorhanden ist - da es sich letztlich um ein engineer-to-order Produkt handelt -, hieraus resultiert der Bedarf, Plandaten in die Produktion zu integrieren. Die Aufgabe Plandaten in das CONWIP-System zu integrieren übernimmt das LPS.

Durch die Wochenplanung/ Tagesplanung erfolgt letztlich die Produktionsfreigabe (welche nicht mit der durch die CONWIP-Methode induzierten Freigabe durch das Pull-Signal zu verwechseln ist). Die Produktionsfreigabe der Wochenplanung/ Tagesplanung umfasst eine Liste der zu produzierenden Objekte bzw. der zu erledigenden Aufgaben. Es handelt sich somit um eine sog. „Backlogliste“³⁸⁶. Die Aufgaben innerhalb der Backlogliste müssen einen für die CONWIP-Steuerung geeigneten Umfang besitzen. In Abbildung 6-7 ist die Integration der Wochen-/Tagesplanung des LPS in die CONWIP-Steuerung dargestellt.

Nach der Produktionsfreigabe gilt es sicherzustellen, dass die Aufträge die Produktion möglichst ohne besondere negative Vorkommnisse durchlaufen. Hierzu eignen sich insbesondere Shopfloor Managementmethoden (vgl. (Illing 2013) und (Hofacker et al. 2010)). Shopfloor Managementmethoden zeichnen sich besonders durch eine Stärkung der Interaktion zwischen Ausführungs- und Leitungsebene aus. Hauptsächlich kommen intuitive Managementwerkzeuge wie Visualisierungen, PDCA-Zyklen, A3-Reports usw. zum Einsatz. Ein besonders wichtiger Punkt des Shopfloor Managements ist der Umgang mit außerplanmäßigen Ereignissen. Selbst eine perfekt durchplante Produktion verhält sich selten komplett so, wie in der Planung angenommen, hieraus folgt die Notwendigkeit einer „reaktive Bauproduktionssteuerung“.

Der Prozess „Produktionstracking“ ist notwendig, um die anderen Prozesse mit aktuellen Daten aus der Produktion zu versorgen. Nur auf Basis von aktuellen Produktionsdaten können Entscheidungen getroffen werden, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit einen positiven Einfluss auf die Produktion haben.

Der Prozess „Lernen/Wissensmanagement“ ist ein ständiger Begleiter aller übrigen Prozesse. Auf der einen Seite muss das Produktionssystem so gestaltet werden, dass individuelle Lernmöglichkeiten gegeben sind (d.h. auch, dass ein gewisser Zeitraum hierfür vorgesehen ist). Auf der anderen Seite muss auch dafür gesorgt werden, dass das individuell angereicherte Wissen anderen Interessenten zugänglich gemacht wird (Thema: Wissensmanagement). Wichtig ist allerdings auch, dass die eingesetzten Methoden nicht dazu führen, dass die Arbeitskräfte einen ausufernden Dokumentationsaufwand haben.

³⁸⁶ Die Backlogliste entspricht der Reihenfolge der zu erledigenden Aufgaben.

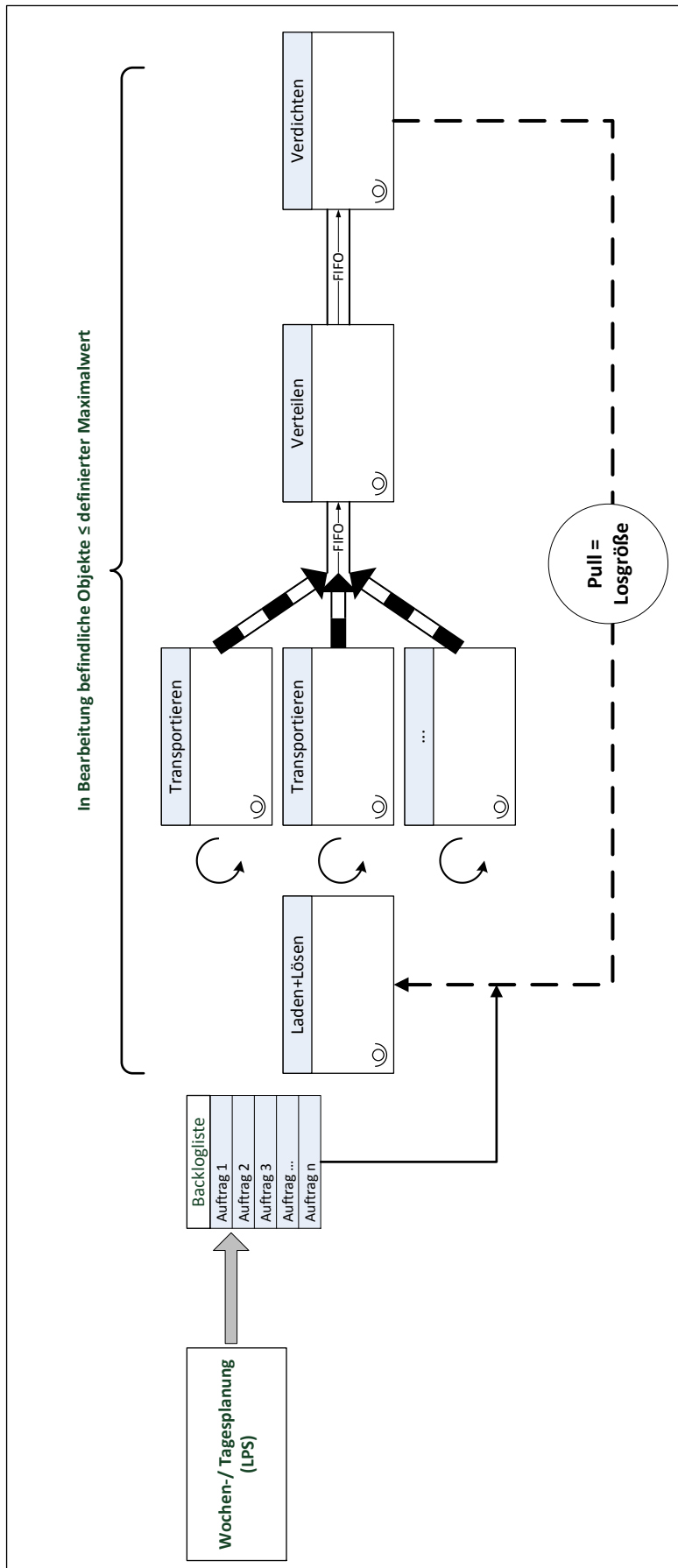


Abbildung 6-7: Integration der Wochen- /Tagesplanung des LPS

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Abschließend werden die Inhalte der wissenschaftlichen Arbeit in komprimiert Form wiedergegeben und die wesentlichen Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit kritisch hinterfragt sowie ein Ausblick für zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Die in Kapitel 1.3 vorgestellten Forschungsfragen:

- F1. Welche Wirkungsmechanismen haben die Ansätze „Minimierung von Verschwendung“, „Minimierung von Variabilität“ und das „Pull-Prinzip“ im Bauwesen und was ist bei deren Umsetzung im Spezialfall „Erdbau“ zu berücksichtigen?
- F2. Wie kann eine Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Lean Management Prinzipien im „Erdbau“ umgesetzt werden?

wurden in ein Forschungsmodell integriert (vgl. Abbildung 1-2). Das Forschungsmodell stellt das Grundgerüst der Arbeit dar und die weiteren Kapitel dienen dazu, dem Leser das notwendige Grundwissen zu vermitteln (Kapitel 2 und Kapitel 3), die Ist-Situation auf Erdbaustellen zu beschreiben (Teile von Kapitel 3 und insbesondere Kapitel 4), sowie die Forschungsfragen und damit verbundenen Hypothesen genauer zu analysieren (Kapitel 5 und 6).

In Kapitel 2 werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen aus dem Bereich Lean Management im Bauwesen dargestellt. Hierzu werden die Historie (vgl. Kapitel 2.1), die wesentlichen Ansätze (vgl. Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3) und deren Wirkungsebenen (vgl. Kapitel 2.4), die zugrunde liegende Produktionstheorie (vgl. Kapitel 2.5) des Lean Managements im Bauwesen sowie die generellen Ursachen von Verschwendung in Produktionsvorgängen (Kapitel 2.6) erläutert.

Kapitel 3 beschreibt eine generische Modellierung der Bauproduktionsplanung und -steuerung mit dem Fokus auf Erdbaustellen. Das Kapitel trägt auf der einen Seite zur Erläuterung der Fragestellung „Was bedeutet Bauproduktionsplanung und -steuerung im Erdbau?“ bei. Auf der anderen Seite werden bestimmte Sachverhalte anhand mathematischer Modellierung deskriptiv dargestellt. Anhand der Modelle werden Zusammenhänge genauer beschrieben und die in der Bauproduktion existierende Komplexität veranschaulicht.

Das 4. Kapitel widmet sich der Beschreibung der momentanen Situation auf Erdbaustellen. Hierzu werden zunächst die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte im Erdbau erläutert (vgl. 4.1). Anschließend wird anhand von Ergebnissen aus unterschiedlichen Fallstudien dargestellt, welche Optimierungspotentiale im Erdbau bestehen (vgl. Kapitel 4.2). Abschließend wird dargestellt, welches die wesentlichen Kritikpunkte an der traditionellen Vorgehensweise in der Bauproduktionsplanung und -steuerung sind (vgl. Kapitel 4.3).

Kapitel 5 und 6 stellen den Kern der Arbeit dar und widmen sich der Analyse der aufgestellten Forschungsfragen.

Kapitel 5 fokussiert sich auf die Beantwortung von Forschungsfrage 1. Es werden zunächst die Ansätze „Minimierung von Verschwendung und Variabilität“ und das „Pull-Prinzip“ genauer beschrieben und deren Wirkungsmechanismen diskutiert sowie deren Bedeutung für den Erdbau dargestellt (vgl. Kapitel 5.1). Hierbei werden bisher nicht beachtete Zusammenhänge bezüglich der Minimierung von

Verschwendung erläutert (vgl. Kapitel 5.1.1). Anschließend wird erläutert, welchen Vorteil der Ansatz der Reduktion von Variabilität im Zusammenhang mit der Auslastung (bzw. Dimensionierung) von Baumaschinen hat (vgl. Kapitel 5.1.2). Folgend wird anhand einer Modellierung der Bestandsplanung und einer Modellierung der Prognose in der Bauproduktionsplanung erläutert, warum das Pull-Prinzip auch im Erdbau geeignet ist (vgl. Kapitel 5.1.3). Es wird gezeigt, dass alle drei Ansätze eine große Relevanz für den Erdbau haben.

In Kapitel 5.2 wird erläutert, was bei einer Prozessoptimierung aus Sicht des Lean Managements zu beachten ist. Insbesondere wird anhand mathematischer Zusammenhänge dargestellt, warum die Ansätze des Lean Managements äußerst vielversprechend sind.

Im folgenden Kapitel 5.3 wird erläutert, was bei der Flussoptimierung nach den Lean Management Prinzipien zu beachten ist. Hierbei wird zum einen insbesondere darauf eingegangen, welche Konsequenzen aus unterschiedlichen Kopplungsvarianten für Produktionsprozesse resultieren. Zum anderen wird aufgezeigt, was bei der Reduktion von Losgrößen zu beachten ist.

Kapitel 6 widmet sich der exemplarischen Beantwortung der Forschungsfrage F2. Zunächst wird analysiert, wie das Pull-Prinzip im schweren Erdbau umgesetzt werden kann und welche Vorteile hieraus resultieren (vgl. Kapitel 6.1). Innerhalb des Kapitels 6.1.1 wird der Vorteil der Implementierung eines Pull-Prinzips bei der Steuerung von Leerfahrzeugen nachgewiesen. Kapitel 6.1.2 widmet sich dem Nachweis der Vorteilhaftigkeit eines Pull-Prinzips bei der Steuerung der klassischen Aufgaben des schweren Erdbaus („Laden&Lösen“, „Transportieren“ und „Einbauen“). Anhand einer umfassenden Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, dass das Pull-Prinzip erhebliche Vorteile gegenüber dem Push-Prinzip besitzt. In Kapitel 6.1.3 wird dargestellt, wie die Ergebnisse aus den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2 zusammengeführt werden können. Abschließend wird in Kapitel 6.2 dargestellt, wie die vorgestellten Ergänzungen innerhalb bereits bestehender Abläufe der Bauproduktionsplanung und -steuerung integriert werden können.

Kapitel 7 dient der Zusammenfassung und kritischen Hinterfragung der aufgeführten Ergebnisse sowie dem Aufzeigen von zukünftigen Forschungsbereichen.

7.2 Fazit und Ausblick

Aus den Ergebnissen der Kapitel 4 und Kapitel 5 ist abzuleiten, dass die auf Erdbaustellen existierenden Potentiale der Minimierung von Verschwendung erheblich sind. Gleichzeitig sind diese Potentiale nur erreichbar, wenn die Komponente Mensch nicht vernachlässigt wird, d.h. die Einbindung der betroffenen Personen ist zwingend notwendig. Der nachhaltige Erfolg von Maßnahmen hängt wesentlich von der Akzeptanz bei den Betroffenen ab³⁸⁷.

Die Minimierung der Variabilität von Bauproduktionsprozessen im Erdbau (vgl. Kapitel 5.1.2) ist eine besondere Art der Reduktion von Verschwendung (vgl. Kapitel 5.1.1). Gerade im Erdbau scheinen hierbei zunächst erhebliche Probleme zu bestehen, wie z.B. mangelnde Transparenz der Prozesse, Witterungsempfindlichkeit und Ungewissheit bezgl. der existierenden geologischen Verhältnisse. Diese Probleme bedingen geradezu Variabilität in den Prozessen. So wird es vermutlich real nie möglich sein, jegliche Schwankungen zu beseitigen, dennoch besteht erhebliches Potential in ihrer Reduktion.

Es kann angenommen werden, dass mit größer werdenden Steuerungszykluszeiten (vgl. Kapitel 5.1.3) Abweichungen später erkannt und Steuerungsmöglichkeiten verpasst werden. Des Weiteren sinkt die Güte der Prognosen bei steigenden Steuerungszykluszeiten. Hierbei handelt es sich um eine qualitative Aussage, die Größe der Abweichungen hängt stark davon ab, wie komplex und dynamisch das

³⁸⁷ Vgl. (Goldratt 1990) und (Kudernatsch 2013).

beobachtete System ist. Spät erkannte Abweichungen führen zu größeren Opportunitätskosten (d.h. Potenziale werden nicht genutzt). Gleichzeitig ist zu beachten, dass in diesem Zusammenhang nicht das klassische „Controlling“ gemeint ist. Vielmehr sind Themen wie Autonomie einzelner Verbunde oder Individuen gemeint (d.h. Steuerung direkt durch Betroffene und nicht durch Kontrolleure). Klassisches Controlling kann bei der Umsetzung von geringen Steuerungszyklen zu erheblichen zusätzlichen Kosten (insbesondere in Form von zeitlichem Aufwand) führen. Der Idealzustand ist, wenn alle beteiligten Individuen autonom im Sinne des Unternehmens handeln. Durch einen kurzzyklischeren Regelkreis können Steuerungsmöglichkeiten schneller erkannt werden. Hierdurch können Projektrisiken verringert und -chancen gesteigert werden. Außerdem sind die Prognosen zwischen den Steuerungszyklen realistischer. Eine reine Beschleunigung des Regelkreises bringt allerdings nur unter der Voraussetzung einer verbesserten Informationslogistik den gewünschten Erfolg.

Eine bessere Informationslogistik wird insbesondere erreicht durch:

- eine verbesserte Rohdatengewinnung,
- eine bessere Aufbereitung und Bereitstellung der Informationen, die aus den Rohdaten abgeleitet werden können und
- eine Verkürzung der Informationswege (d.h. Verlagerung von Entscheidungsbefugnissen auf die Ebenen derjenigen, die die Informationen sammeln).

Momentane Entwicklungen aus der „Digitalisierung“ der Baustelle³⁸⁸ tragen zu einem höheren und besseren Vernetzungsgrad in der Informationslogistik bei. Building Information Modelling (vgl. Kapitel 2.4.7) befindet sich noch am Anfang der Entwicklung und kann zu erheblichen Prozessverbesserungen führen. Im Erdbau spielt die Entwicklung weiterer Sensorik eine wesentliche Rolle, sie ist Voraussetzung zur digitalisierten Erdbaustelle. Insbesondere die Punkte Interoperabilität, Nutzerfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit werden hierbei jedoch eine erhebliche Rolle beim Entscheid über Misserfolg oder Erfolg dieser Entwicklungen spielen.

Des Weiteren setzt ein optimaler Produktionsablauf voraus, dass Lieferantenprozesse entsprechend des Bedarfs der jeweiligen Kundenprozesse handeln. Diese Erkenntnis kann aus der Analyse des Pull-Prinzips (vgl. Kapitel 5.1.3, 5.3 und 6.1) gewonnen werden. Damit das Pull-Prinzip umsetzbar ist, muss der Lieferant die Anforderungen des Kunden kennen³⁸⁹. Dies setzt einen Informationsaustausch zwischen Kunde und Lieferant voraus und dies wiederum einen Willen zur Kooperation.

Das Ziel des „One-Piece-Flow“ (vgl. Kapitel 5.1.3.4) ist eine Idealvorstellung, welche in der baubetrieblichen Praxis allerdings vermutlich aufgrund der wirtschaftlich nicht komplett eliminierbaren Prozessschwankungen eine theoretische Zielvorstellung bleibt.

Bei den in Kapitel 6 abgeleiteten Handlungsempfehlungen für die Bauproduktionssteuerung handelt es sich um exemplarische Beispiele. Die Ableitung weiterer, aus dem Lean Management stammender Handlungsempfehlungen für die Bauproduktionssteuerung ist notwendig. Bezüglich der abgeleiteten Handlungsempfehlung (vgl. Kapitel 6.1) ist zu erwähnen, dass die Validierungsdatensätze der für das Beweisverfahren verwendeten Simulation gering sind. Dies hat zur Folge, dass nicht abschließend nachgewiesen werden kann, dass die Simulation sich wie ein reales System verhält³⁹⁰. Weitere Datenaufnahmen und Simulationen sind in diesem Feld notwendig.

³⁸⁸ vgl. (Günthner et al. 2011).

³⁸⁹ Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Kenntnis der „Wertvorstellung“ des Kunden.

³⁹⁰ Dies gilt allerdings für alle eingesetzten Simulationen.

Als weitere Kritik ist insbesondere zu erwähnen, dass die verwendeten Beweisführungen letztlich nicht alle existierenden exogenen und endogenen Einflüsse berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.1). Ein Modell deckt immer nur bis zu einem gewissen Grad die Realität ab³⁹¹. Insofern ist nicht auszuschließen, dass bei Modellerweiterung zusätzliche, bisher unberücksichtigte Effekte auftreten.

Trotz der obigen Punkte konnte innerhalb der wissenschaftlichen Arbeit nachgewiesen werden, welche erheblichen Verbesserungspotentiale Lean Management besitzt.

Abschließend sei erneut darauf hingewiesen, dass der heutige Fokus der Bauproduktionsplanung und -steuerung insbesondere auf der Steuerung von Input- und Outputgrößen liegt (vgl. Kapitel 2.5). Ein Produktionsprozess hat einen Input, der durch Kombination von Produktionsfaktoren in einen Output umgewandelt wird. Bei dieser Sichtweise liegt der Fokus auf dem Verhältnis zwischen Input und Output, d.h. alles, was während der Produktion passiert, wird quasi „ausgeblendet“. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass das „Black-Box-Denken“ eine Methode ist, mit der versucht wird, die komplexe Realität soweit zu abstrahieren, dass sie erklärbar wird. Weizäcker hat dies passend wie folgt beschrieben:

„Einige Dinge hängen enger zusammen, alles hängt mit allem zusammen. Da wir aber den Zusammenhang von allem mit allem nicht zu denken, sondern nur zu behaupten vermögen, denken wir Einzelnes. Unsere Schwäche ist, dass wir dann das Einzelne isoliert denken, und nicht in seinem echten Zusammenhang. Dann stoßen wir darauf, daß das doch falsch ist - und dies ist das philosophische Grunderlebnis. Und dann versucht man es besser zu machen, bis man entdeckt, daß man es immer noch falsch gemacht hat.“ (Weizäcker 1989)^{392 393}

Basierend auf diesem Wissen ist festzustellen, dass wir - Menschen - auf der einen Seite die Methode der isolierten Betrachtung von bestimmten Zusammenhängen benötigen, weil wir meist nicht dazu in der Lage sind, das Gesamtsystem komplett zu verstehen. Allerdings müssen uns die Schwächen dieser Herangehensweise bewusst sein. Das Ziel sollte immer die Erreichung des Optimums aus Sicht des gesamten Systems sein. Die Feststellung von - „geglaubten“ - lokalen Optima ist hierbei nur der erste Schritt und gibt uns eine Idee davon, was bei der Überführung dieser lokalen Optima in ein globales Optimum zu beachten ist. Gleichzeitig werden wir in den seltensten Fällen in der Lage sein, das globale Optimum zu bestimmen (Was ist das globale Optimum?). Dies resultiert insbesondere aus dem teilweisen Unwissen und der teilweisen Ungewissheit bezüglich der einzelnen Zusammenhänge (Wie setzt sich das globale Optimum zusammen? Wie ist die Gewichtung/Priorisierung einzelner Faktoren? Verändert sich das globale Optimum, d.h. ist es dynamisch?).

Der Ansatz der kontinuierlichen Verbesserung geht davon aus, dass Perfektion erstrebenswert, jedoch gleichzeitig nicht erreichbar ist. Die Kernaussage ist, dass wir einen Status Quo nicht aus Selbstzweck

³⁹¹ „Eine der häufigsten kreativen Aufgaben des Ingenieurs besteht darin, die mit wissenschaftlichen Methoden meist nicht exakt abzubildende Realität mittels Abstraktionen und Vereinfachungen in sogenannten Modellen darzustellen.“ (Arnold & Furmans 2009)

³⁹² Goldratt schreibt hierzu passend: „Our experience shows that over 90% of the problems that industrial organizations are struggling with, on a day to day basis, belong to exactly that category of problems. Problems that arise whenever we try to satisfy local objectives that do not match, at all, the global goal.“ (Goldratt 1990)

³⁹³ Springer betont in diesem Zusammenhang: „In den meisten Fällen wäre es unnötig - und würde bloß Verwirrung stiften -, sämtliche elementaren Aspekte der Dinge, mit denen wir hantieren, im Auge zu behalten. Wir strukturieren unsere Erfahrungen, indem wir Modelle konstruieren, die so einfach sind wie möglich und so komplex wie nötig. Bei dem Versuch, sie anzuwenden, wissen wir: Jedes Modell, so komplex es auch sein mag, ist weniger kompliziert als die Wirklichkeit, der es gerecht zu werden versucht - wahrscheinlich unendlich viel weniger.“ (Springer 2012)

anerkennen, sondern stets hinterfragen, ob es einen besseren Weg gibt - dies gilt auch für - temporär gültige - lokale und - temporär gültige - globale Optima.

Literaturverzeichnis

- Arbulu, R.J. et al., 2003. Value stream analysis of a re-engineered construction supply chain. *Building Research & Information*, 31(2), pp.161–171.
- Arbulu, R.J. & Tommelein, Iris D., 2002. Value Stream Analysis of Construction Supply Chains: Case Study on Pipe Supports used in Power Plans. In *International Group of Lean Construction*. Gramado, Brazil, pp. 183–195.
- Arndt, H., 2008. *Supply Chain Management* 4. ed., Gabler Verlag.
- Arnold, D. & Furmans, K., 2009. *Materialfluss in Logistiksystemen* 6., erweiter., Springer.
- Ballard, G., 1999. Can Pull Techniques be used in Design Management. In Helsinki (Finnland): Concurrent Engineering in Construction.
- Ballard, G., 2000a. Lean Project Delivery System.
- Ballard, G., 2002. Managing work flow on design projects: a case study. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 9/3, June, pp.284–291.
- Ballard, G., 2000b. Positive vs Negative Iteration in Design. In Brighon (United kingdom): International group for lean construction.
- Ballard, G., 2000c. *THE LAST PLANNER SYSTEM OF PRODUCTION CONTROL*. School of Civil Engineering Faculty of Engineering The University of Birmingham.
- Ballard, G., 2008. The Lean Project Delivery System: An Update. *Lean Construction Journal*, pp.1–19.
- Ballard, G., Hammond, J. & Nickerson, R., 2009. Production control principles. In Taipei (Taiwan): International group for lean construction.
- Ballard, G. & Howell, G.A., 2003. An update on Last planner. In *International Group of Lean Construction*. Virginia, USA.
- Ballard, G. & Koskela, L., 1998. On the Agenda of Design Managmeent Research. In Guaruja (Brazil): International group for lean construction.
- Barraza, G.A., 2011. Probabilistic Estimation and Allocation of Project Time Contingency. *Journal of Construction Engineering and Management*, April, pp.259–265.
- Bassioni, H.A., Price, A.D.F. & Hassan, T.M., 2004. Performance Measurement in Construction. *Journal of Management in Engineering*, April, pp.42–50.
- Bauer, H., 2006. *Baubetrieb* 3. ed., Springer.
- Baumgärtel, T. et al., 2011. Bauen heute und morgen. In *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen, Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhunder*. Springer, pp. 1–21.

- Bertelsen, S., 2003. Complexity - construction in a new perspective. In *11. International Group of Lean Construction*. Blacksburg, USA.
- Bertelsen, S. & Koskela, L., 2002. Managing the three aspects of Production in construction. In *10. International Group of Lean Construction*. Gramado, Brazil, pp. 1–9.
- Börkircher, M., 2011. *Simulationsbasierter Ansatz zur Unterstützung der Bauproduktionsplanung*. Karlsruher Institut für Technologie KIT.
- Börkircher, M. & Gamber, T., 2010. Simulationsunterstütztes Wertstromdesign: Ansatz zur Steigerung des Wertschöpfungspotenzials in der Baustoffindustrie. In G. Zülch & P. Stock, eds. *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, pp. 405–412.
- Bregenhorn, T., 2013. Generische Modellierung der Bauproduktionsplanung und -steuerung im schweren Erdbau. In S. Kirn & M. Müller, eds. *Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik*. Göttingen: CUVILLIER, pp. 93 – 124.
- Bregenhorn, T. & Gentes, S., 2012. Potentiale der Baumaschinensensorik für die Bauproduktionssteuerung im Erdbau. In *5th Fachtagung für Baumaschinentechnik*. Dresden: Technische universität Dresden, pp. 459–474.
- Carmichael, D.G., 1987. *Engineering Queues in Construction and Mining*, Ellis Horwood.
- Caterpillar, I., 2007. *Caterpillar Performance Handbook* 37th ed., Peoria, Illinois, USA: Caterpillar Inc.
- Chong, W., Lee, S. & O'Connor, J.T., 2011. Estimating Highway Construction Production Rates during Design: Elements of a Useful Estimation Tool. *Leadership and Management in Engineering*, July, pp.258–266.
- Chou, J., 2009. Generalized linear model-based expert system for estimating the cost of transportation projects. *Expert Systems with Applications*, 36, pp.4253–4267.
- Chu, D., Strand, R. & Fjelland, R., 2003. Theories of Complexity. *Complexity*, 8, pp.19–30.
- Darrington, J.W. & Howell, G.A., 2010. An optimised project requires optimised incentives. In *International Group of Lean Construction*. Haifa, Israel, pp. 591–600.
- DB, 2008. DB ProjektBau zäumt die Baustelle von hinten auf. *DB Welt*, September, p.11.
- Deml, A., 2008. *Entwicklung und Gestaltung der Baulogistik im Tiefbau: Dargestellt am Beispiel des Pipelinebaus* 1st ed., Kovac, J;
- DESTATIS, 2012a. *Bauhauptgewerbe / Ausbaugewerbe - Lange Reihen*, Wiesbaden.
- DESTATIS, 2012b. *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Inlandsproduktsberechnung Lange Reihen ab 1970* Fachserie., Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Dickmann, P., 2009. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen*, Springer-VDI-Verlag.
- DIN EN ISO 6385, 2004. Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004.

- Domschke, W. & Drexl, A., 2011. *Einführung in Operations Research* 8. ed., Berlin Heidelberg: Springer.
- Drees, W.P.G., 2011. *Kalkulation von Baupreisen* 11th ed., Beuth.
- Durkheim, E., Werner, U. & Pastor, W., 2010. *Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB). Verordnungen über die Honare für Leistungen der Architekten und Ingenieure (HOAI). VOB Teil A und B*, DTV-Beck.
- Erlach, K., 2007. *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*, Springer.
- Eymer, W. et al., 2007. *Grundlagen der Erdbewegung*, Kirschbaum Verlag.
- Fernández-Solis, J.L., 2007. The Systemic Nature of the Construction Industry. In *CIB World Building Congress*. pp. 1598–1625.
- Fischermanns, G., 2006. *Praxishandbuch Prozessmanagement*, Gießen: Verlag Dr. Götz Schmidt.
- Fleischmann, B., 2008. Begriffliche Grundlagen. In Dieter Arnold et al., eds. *Handbuch Logistik*. Springer-VDI-Verlag, pp. 3–12.
- Flyvbjerg, B., Holm, M.S. & Buhl, S., 2002. Underestimating costs in public works projects - Error or Lie? *Journal of the American Planning Association*, 68(3), pp.279–295.
- Formoso, C.T. & Isatto, E.L., 2009. Production Planning and Control and the Coordination of Project Supply Chains. In W. J. O'Brien et al., eds. *Construction Supply Chain Management*. CRC Press, pp. 1–25.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics (Wright Allen Series in System Dynamics)*, The MIT Press.
- Freundt, M., Beucke, K. & Bargstädt, H.-J., 2004. Ein flexibles Modell für die Bauablaufplanung. *Bauingenieur*, Band 79, pp.534–543.
- Frey, U., 2011. Produktivität in der Bauwirtschaft: Gründe, die Arbeit richtig zu tun. *Schweizer Bauwirtschaft*, 16.
- Gehbauer, F., 2004. *Baubetriebsplanung und Grundlagen der Verfahrenstechnik im Hoch-, Tief- und Erdbau - Band I*, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Gehbauer, F., 2008. *Lean Management im Bauwesen*, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Gehbauer, F., 1974. *Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulationen im Erdbau*. Karlsruher Institut für Technologie.
- Gehbauer, F. & Kirsch, J., 2006. Lean Construction – Produktivitätssteigerung durch schlanke Bauprozesse. *Bauingenieur Band 81*, pp.504 – 509.
- Girmscheid, G., 2010a. Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Anforderungsentwicklungsprozess und Ziel-Erreichungs-Controlling - Teil 2. *Bauingenieur*, Mai, pp.204–209.
- Girmscheid, G., 2010b. Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Modellentwicklung und Zielentwicklungsprozess Teil1. *Bauingenieur*, Mai, pp.197–203.

- Girmscheid, G., 2008a. Bauproduktionstheorie – Bauproduktionsprozessplanung und –steuerung. *Bauingenieur Band 83*, pp.36 – 48.
- Girmscheid, G., 2007a. Bauproduktionstheorie – Strukturrahmen. *Bauingenieur Band 82*, pp.397 – 403.
- Girmscheid, G., 2006. Fast Track Projects – Generisches , axiomatisches Anforderungsmanagement. *Bauingenieur Band 81*, pp.10–16.
- Girmscheid, G., 2007b. Holistisch kybernetisches Kostensteuerungsmodell - Projektentwicklungsphase. *Bauingenieur*, Band 82, pp.495–503.
- Girmscheid, G., 2007c. Holistisch kybernetisches Kostensteuerungsmodell - Vorplanungs- bis Ausführungsphase. *Bauingenieur*, Band 82, pp.504–511.
- Girmscheid, G., 2010c. *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*, Springer.
- Girmscheid, G., 2005. Parterschaften und Kooperationen in der Bauwirtschaft - Chance oder Irrweg? *Bauingenieur*, Februar, pp.103–113.
- Girmscheid, G., 2007d. Struktur des Bauproduktionsprozesses. *Bauingenieur Band 82*, pp.404 – 413.
- Girmscheid, G., 2008b. Systemauswahl und Bereitstellungsvariante von Bauproduktionseinrichtungen - Entscheidungsmodell. *Bauingenieur*, Band 83, pp.136 – 146.
- Girmscheid, G., 2008c. Systemauswahl und Bereitstellungsvariante von Bauproduktionseinrichtungen - Prognosemodell. *Bauingenieur*, Band 83, pp.127–135.
- Goldratt, E.M., 1990. *What is this thing called Theory of Constraints and how should it be implemented?*, North River Pr.
- Goldratt, E.M. & Cox, J., 2004. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*, North River Pr.
- Gollenbeck-Sunke, N. & Schultmann, F., 2010. Ressource classification and allocation in project-based production environments. *International Journal of Project Organisation and Management*, 2, pp.122 – 134.
- Günther, H.-O. & Tempelmeier, H., 2009. *Produktion und Logistik*, Springer.
- Günthner, W.A. et al., 2011. *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen* W. A. Günthner & A. Borrmann, eds., Heidelberg: Springer-VDI-Verlag.
- Günthner, W.A. et al., 2009. *Transportlogistikplanung im Erdbau: Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Optimierung der transportlogistischen Ablaufplanung im Erdbau basierend auf dem Ansatz der Berechnung von Stetigförderern im Bereich der Fördertechnik*, fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik - Technische Universität München.
- Günthner, W.A., Sanladerer, S. & Kessler, S., 2006. Telematikeinsatz im Baustellenbetrieb zur optimalen Transportabwicklung. *Logistics Journal : nicht-referierte Veröffentlichungen*, Vol. 2006.
- Günthner, W.A. & Zimmermann, J., 2008. *Logistik in der Bauwirtschaft*, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml) TU München.

- Gutenberg, E., 1970. *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Band 1: Die Produktion* 24th ed., Springer.
- Hamzeh, F.R., Ballard, G. & Tommelein, I. D., 2008. Improving construction work flow - the connective role of lookahead planning. In *International Group of Lean Construction*. Manchester, UK, pp. 635–646.
- Harrant, H. & Hemmrich, A., 2004. *Risikomanagement in Projekten*, Hanser Verlag.
- Hassanein, A. & Moselhi, O., 2004. Planning and scheduling highway construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.638 – 646.
- Heidemann, A., 2010. *Kooperative Projektabwicklung im Bauwesen unter der Berücksichtigung von Lean-Prinzipien – Entwicklung eines Lean-Projektabwicklungssystems*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Heinen, E., 1991. *Betriebswirtschaftliche Kostenlehre. Kostentheorie und Kostenentscheidungen*, Gabler, Betriebswirt.-Vlg; Auflage: 6., verb. u. erw. A.
- Heinen, T., 2008. Struktur- und Layoutplanung. In Dieter Arnold et al., eds. *Handbuch Logistik*. Springer, pp. 307 – 323.
- Hofacker, A., 2010. *Bewertung und Einführung von Lean-Methoden in der Einzel- und Kleinserienfertigung am Beispiel des Stahlbaus*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Hofacker, A., Hickethier, G. & Bregenhorn, T., 2010. Der Baustellen-Leitstand - Shop-Floor-Management-Konzept für Baustellen.
- Hokstad, P., 1987. Engineering queues in construction and mining. *European Journal of Operational Research*, 31, pp.390–391.
- Hopp, W.J. & Spearman, M.L., 2011. *Factory Physics*, Waveland Press.
- Howell, G.A. & Macomber, H., 2002. A Guide for New Users of the Last Planner System - Nine Steps for Success.
- Hüster, F., 2005. *Leistungsberechnung der Baumaschinen*, Shaker; Auflage: 5., Aufl.
- Hyun Jeong, C. et al., 2004. Deplan: A tool for integrated design management. *Automation in Construction*, 13/3, pp.313–326.
- Ikuma, L.H., Nahmens, I. & James, J., 2011. Use of Safety and Lean Integrated Kaizen to Improve Performance in Modular Homebuilding. *Journal of Construction Engineering and Management*, July, pp.551–560.
- Illing, H., 2013. Shopfloor-Management. *Management und Qualität*, 3, pp.12 – 13.
- Imai, M., 1997. *Gemba Kaizen*, McGraw-Hill.
- Imai, M., 1986. *Kaizen: The Key To Japan's Competitive Success*, McGraw-Hill.
- Ji, A. et al., 2009. An Integrated 3D Simulation Framework for Earthwork Processes. In *Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction*.

- Keith, D., 2013. Lean Management - Probleme mit dem Problemlösen. *Management und Qualität*, 01-02, pp.20 – 21.
- Kirchbach, K., Bregenhorn, T. & Gehbauer, F., 2012. Digital Allocation of Production Factors in Earth Work Construction. In *International Group of Lean Construction*. San Diego.
- Kirn, S. et al., 2013. *Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik* S. Kirn & M. Müller, eds., Göttingen: CUVILLIER.
- Kirsch, J., 2008. *Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme - Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer*. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Knaupe, W., 1977. *Erdbau*. 3rd ed., Verlag für Bauwesen Berlin.
- Koether, R., 2008. Logistikaufgaben. In *Taschenbuch der Logistik*. Carl Hanser Verlag; Auflage: 3., aktualisierte Auflage, pp. 37–54.
- Koskela, L., 2000. *An exploration towards a production theory and its application to construction*, VTT Publications.
- Koskela, L., Ballard, G. & Tanhuanpää, V.-P., 1997. Towards Lean Design Management. In Griffith (Australia): International group for lean construction.
- Koskela, L. & Howell, G.A., 2002. The underlying theory of project management is obsolete. In *PMI Research Conference*. Seattle: IEEE Engineering Management Review, pp. 293–302.
- Koskela, L. & Kagioglou, M., 2005. On the Metaphysics of Production. In *International Group of Lean Construction*. Sydney.
- Kotter, J.P., 2012. Die Kraft der zwei Systeme. *Harvard Business manager*, Dezember(Change Management), pp.22–36.
- Kudernatsch, D., 2013. Lea-Kultur im Unternehmen - Lean Leadership. *Management und Qualität*, 01-02, pp.17 – 19.
- Kuhlmann, W., 2011. Baumaschinen. In Manfred Hoffmann & Thomas Krause, eds. *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. Vieweg+Teubner Verlag, pp. 717–788.
- Kühn, G., 1984. *Der maschinelle Erdbau*., Teubner Verlag.
- Lanza, G., 2013. *Integrierte Produktionsplanung*, Karlsruher Institut für Technologie.
- Laufer, A., 1991. Construction planning in uncertain environments. *Project Management*, 9, pp.53–60.
- Lee, D.-E., 2005. Probability of Project Completion Using Stochastic Project Scheduling Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, March, pp.310–318.
- Lichtig, W. & Kievet, D., 2012. A Primer on Boldt's Integrated Lean Project Delivery System (ILPD). In U. Rickers & S. Krolitzki, eds. *Lake Constance 5D-Conference 2012 - Proceedings*. Konstanz: VDI Verlag, pp. 78–101.
- Liker, J.K., 2009. *Der Toyota Weg - 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*, FinanzBuch Verlag.

- Liu, M., Ballard, G. & Ibbs, W., 2011. Work Flow Variation and Labor Productivity: Case Study. *Journal of Management in Engineering*, October, pp.236–242.
- Martin, J. et al., 2011. *Zahlentafeln für den Baubetrieb*, Vieweg+Teubner Verlag.
- Mattila, K.G. & Bowman, M.R., 2004. Accuracy of Highway Contractor`s Schedules. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.647–655.
- Mattivi, N., 2008. Connecting Office, People and Machines: The New Way to Increase Productivity on Earthmoving and Road Construction. In H. Ingensand & W. Stempfhuber, eds. *Conference on Machine Control & Guidance*. Zürich: ETH.
- Mauboussin, M.J., 2012. Erfolg messen - aber mit den richtigen Kennzahlen! *Harvard Business manager*, 12, pp.50–60.
- Miranda Filho, A.N., Heineck, L.F.M. & Moreira da Costa, J., 2012. Revisiting the concept of flexibility. In *International Group of Lean Construction*. San Diego.
- Moser, L. & Santos, A., 2003. Exploring the role of visual controls on mobile cell manufacturing: A case study on drywall technology. In *International Group of Lean Construction*. Blacksburg, USA.
- Muschel, R., 2012. Straßenbau droht Stillstand – Bund kürzt Finanzmittel. *Badische Zeitung*.
- Ohno, T., 2009. *Das Toyota-Produktionssystem* 2nd ed., Campus Verlag.
- Ott, M., 2007. *Fertigungssystem Baustelle – Ein Kennzahlensystem zur Analyse und Bewertung der Produktivität von Prozessen*. Karlsruher Institut für Technologie KIT.
- Ott, M., 2005. Produktivität und Qualität in der Baustellenfertigung steigern. *Bauwirtschaft*, 3, pp.25–28.
- Pachow-Frauenhofer, J. et al., 2008. Grundlagen der Produktionslogistik. In *Handbuch Logistik*. Springer, pp. 295 – 307.
- PMBOK, 2008. *Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)* 4th ed., Project Management Institute, Inc.
- Puddicombe, M.S., 2006. The Limitations of Planning: The Importance of Learning. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.949–955.
- Rausch, P., Schreiber, F. & Diegelmann, M., 2008. Effiziente Prozessgestaltung im Erd- und Straßenbau durch den Einsatz von satellitengestützten Entscheidungsunterstützungssystemen. In *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*. Springer, pp. 305–313.
- REFA, 1986. *Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Darmstadt – Fachausschuß Bauwesen.: Teil 1- Grundlagen* 2. Auflage., ztv-Verlag.
- Romano, N., 2008. Lean, Leaner, Leanest. In Boulder (USA): Annual Lean Construction Institut Congress.
- Rother, M. & Harris, R., 2006. *Kontinuierliche Fließfertigung organisieren - Praxisleitfaden zur Einzelstück-Fließfertigung für Manager, Ingenieure und Meister in der Produktion* Deutsche A., Lean Management Institut.

- Rother, M. & Shook, J., 2004. *Sehen Lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*, Mannheim: Druckerei Schwörer.
- Russell, J.S., Jaselskis, E.J. & Lawrence, S.P., 1997. Continuous assessment of project performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, March, pp.64–71.
- Sacks, R. et al., 2010. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.968–980.
- Salem, O. et al., 2006. Lean Construction: From Theory to Implementation. *Journal of Management in Engineering*, October, pp.168–175.
- Salvatierra-Garrido, J. & Pasquire, C., 2011. Value theory in lean construction. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 16, pp.8–18.
- Schmidt, A. & Schneider, M., 2007. Kennzahlen und Kennlinien als Steuerungsinstrumente des Materialflusses. In D. Arnold et al., eds. *Handbuch Logistik*. Springer-VDI-Verlag, pp. 397–404.
- Schmidt, M., 2007. Produktionsplanung und -steuerung. In D. Arnold et al., eds. *Handbuch Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-VDI-Verlag, pp. 323–343.
- Schmitt, R., 2008a. Lean Construction Systems (LCS) bringen verbesserte Ergebnisse bei Qualität, Kosten und Termineinhaltung. *BauPortal*, 1, pp.28–30.
- Schmitt, R., 2008b. Lean Management. *BauPortal*, 12, pp.762–765.
- Schmitt, R. & Wladimir, W., 2012. Der Lean-Entwicklungsstand in der Praxis. *BauPortal*, 12, pp.33–35.
- Schuh, G., Gierth, A. & Schiegg, P., 2006. Prozessarchitektur. In G. Schuh, ed. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin Heidelberg: Springer-VDI-Verlag, pp. 81–107.
- Schuh, G. & Lassen, S., 2006. Funktionen. In *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin / Heidelberg: Springer-VDI-Verlag, pp. 195–292.
- Schuh, G. & Roesgen, R., 2006. Aufgaben. In G. Schuh, ed. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin / Heidelberg: Springer-VDI-Verlag, pp. 28–80.
- Schütz, M. & Hofstadler, C., 2012. Anwendung des System Engineering auf die Arbeitsvorbereitung von Bauprojekten. *Bautechnik*, 11, pp.801 – 813.
- Simon, S. et al., 2009. Last Planner, ein Instrument für Bauprojekte nach den Grundsätzen des Lean Managements. In V.-G. B. Verein Deutscher Ingenieure, ed. *Jahrbuch 2009 Bautechnik*. Düsseldorf: VDI Verlag, pp. S.116–143.
- Smalley, A., 2005. *Produktionssysteme glätten: Anleitung zur Lean Production nach dem Pull-Prinzip - angepasst an die Kundennachfrage*, Lean Enterprise Institute; Auflage: 1., Aufl. Version 1.0.
- Smith, R.E., Mossman, A. & Emmitt, S., 2011. Lean and Integrated Project Delivery. *Lean Construction Journal*, pp.01–16.
- Smith, S.D., Wood, G.S. & Gould, M., 2000. A new earthworks estimating methodology. *Construction Management and Economics*, 18, pp.219–228.

- Sonntag, G. & Hicketier, G., 2010. Neuer Elan für Projektverträge: Lean Management im Bauwesen. In *Jahrbuch Baurecht 2011*. Neuwied: Werner Verlag, pp. 160–192.
- Spang, K., 2006. Innovative Projektabwicklung bei Bauprojekten - Plädoyer für ein Paradigmenwechsel -. *Bauingenieur*, Band 81, pp.117–125.
- Spear, S. & Bowen, H.K., 1999. Decoding the DNA of the Toyota Production System. *Harvard Business Review*, September-, pp.95–106.
- Springer, M., 2012. Komplexität und Emergenz. *Spektrum der Wissenschaft*, September, pp.48–54.
- Stadtler, H., 2008. Hierarchische Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. In Dieter Arnold et al., eds. *Handbuch Logistik*. Springer-VDI-Verlag, pp. 194–211.
- Sturm, A. & Vos, W., 2008. New Technologies for Telematics and Machine Control. In H. Ingensand & W. Stempfhuber, eds. *Conference on Machine Control & Guidance*. Zürich: ETH.
- Tatum, C.B., Vorster, M. & Klingler, M., 2006. Innovations in Earthmoving Equipment: New Forms and Their Evolution. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.987–997.
- Teicholz, P., 2004. Labor Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies. *AECbytes*, April.
- Tempelmeier, H., 2008. *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen (German Edition)*, Springer.
- Tezel, A., Koskela, L. & Tzortzopoulos, P., 2010. *Visual Management in Construction-Study Report on Brazilian Cases*, Salford Centre for Research and Innovation in the built and human environment (SCRI).
- Thaller, N.A., 2002. Analyse und Management der externen organisatorisch-sozialen Umfeld der komplexer Infrastrukturprojekte. *Bauingenieur*, Band 77, pp.453–463.
- Theis, P., 2011. Baukosten und Zeitersparnis zur Regel machen - wie Lean Production die Baubranche revolutioniert. In R. Schach, ed. *1. Internationaler BBB-Kongress*. Dresden: reprogress gmbh Dresden.
- Thomsen, C. et al., 2010. *Managing Integrated Project Delivery*, CMAA.
- Tommelein, I. D., Riley, D.R. & Howell, G.A., 1999. Parade Game: Impact of Work Flow Variability on Trade Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, September, pp.304–310.
- Vaziri, K., Garr, P.G. & Nozick, L.K., 2007. Project Planning for Construction under Uncertainty with Limited Resources. *Journal of Construction Engineering and Management*, April, pp.268–276.
- VDI 4499, 2008. *Digitale Fabrik - Grundlagen*.
- Vidal, L.-A. & Marle, F., 2008. Understanding project complexity: implications on project management. *Kybernetes*, 37(8), pp.1094–1110.
- Viljamaa, E. et al., 2012. Advanced Process Control for Infrastructure Building Processes. *Gerontechnology*, Vol 11.

- Vrijhoef, R. & Koskela, L., 2005. Revisiting the three peculiarities of production in construction. In *International Group of Lean Construction*. Sydney, pp. 19–27.
- Weber, J., 2007. *Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten*. Universität Dortmund.
- Weizäcker, C.F., 1989. Wahrnehmung des Denkens. In P. Ackermann et al., eds. *Erfahrung des Denkens - Wahrnehmung des Ganzen*. Akademie Verlag, pp. 94–104.
- Wimmer, J. et al., 2010. Evaluierung einer 3D-modell-basierten Ablaufsimulation von Erdbauprozessen in der Praxis. In *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, pp. 141–148.
- Wöhe, G. & Döring, U., 2013. *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre* 25. ed., Vahlen.
- Womack, J.P. & Jones, D.T., 2003. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, Free Press.
- Womack, J.P. & Jones, D.T., 2007. *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production-- Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars That Is Now Revolutionizing World Industry* Reprint., Free Press.
- Zhang, H. & Li, H., 2004. Simulation-based optimization for dynamic resource allocation. *Automation in Construction*, 13, pp.409–420.

8 Anhang

Anhang 1 - Beispielhafte Berechnung bzgl. Einsatz-Flexibilität

In Abbildung 8-1 ist ein fiktives Beispiel zur Analyse der Vorteilhaftigkeit von Einsatz-Flexibilität dargestellt. Die einzelnen Arbeitsstationen haben eine Wahrscheinlichkeit von 0,8 (entspricht der Verfügbarkeit), dass sie ihre Arbeiten ungehindert ausführen können (Rechtecke). Der redundante Bauproduktionsfaktor hat ebenfalls eine Wahrscheinlichkeit von 0,8, dass er seine Arbeiten ungehindert ausführen kann (Kreis). Im oberen Beispiel ist der redundante Bauproduktionsfaktor für alle Arbeitsstationen gleichermaßen geeignet (Variante „flexibel“). Im unteren Beispiel ist der redundante Bauproduktionsfaktor nur für den mittleren Produktionsprozess geeignet (Variante „unflexibel“).

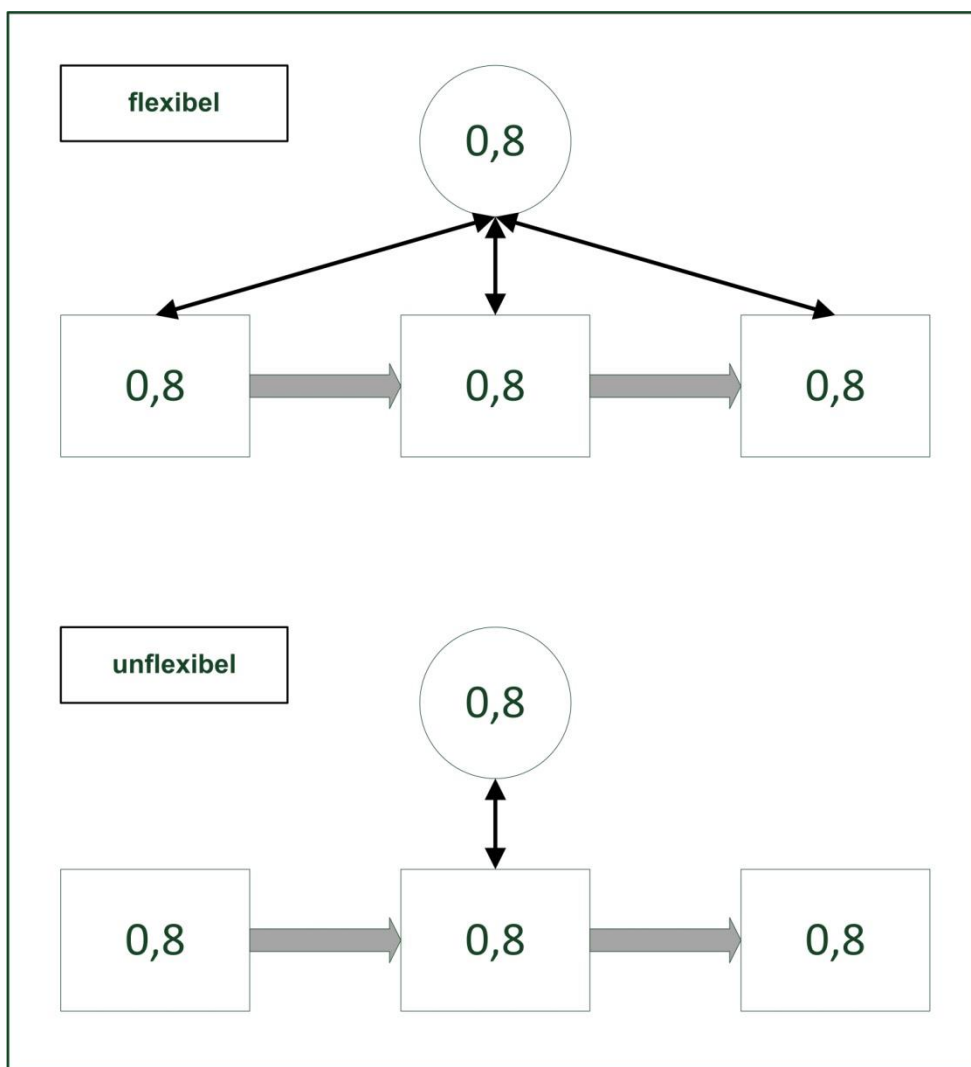


Abbildung 8-1: Aufbau des Produktionssystems bei unterschiedlicher Einsatz-Flexibilität

Die Wahrscheinlichkeiten, dass das gesamte Produktionssystem ungehindert arbeitet ergeben sich zu:

Fall „flexibel“:

$$P_{Ausfall} = \sum_{k=2}^{n_i} \frac{n_i!}{k! \times (n_i - k)!} \times (1 - \text{Verfügbarkeit})^k \times (\text{Verfügbarkeit})^{n_i - k}$$

n_i Entspricht der Anzahl der Gruppe der Bauproduktionsfaktoren, die einen flexiblen Bauproduktionsfaktor enthalten.

$$P_{ungehindert_flexibel} = 1 - P_{Ausfall}$$

$$P_{ungehindert_flexibel} = 1 - (0,2^2 \times 0,8^2 \times 6 + 0,2^3 \times 0,8 \times 4 + 0,2^4) = 0,819$$

bzw.:

$$P_{ungehindert_flexibel} = \sum_{k=3}^{n_i} \frac{n_i!}{k! \times (n_i - k)!} \times \text{Verfügbarkeit}^k \times (1 - \text{Verfügbarkeit})^{n_i - k}$$

$$P_{ungehindert_flexibel} = 4 * 0,8^3 * 0,2 + 0,8^4 = 0,819$$

Fall „unflexibel“:

$$P_{ungehindert_unflexibel} = 0,8 \times (1 - (1 - 0,8)^2) \times 0,8 = 0,6144$$

Hieraus folgt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Variante „flexibel“ ungehindert arbeiten kann, deutlich höher ist, als bei Variante „unflexibel“.

Anhang 2 - Der Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Leistung

Generell gilt der Zusammenhang:

$$Leistung = \frac{Produktionsmenge}{Zeit} \left[\frac{Einheiten}{h} \right]$$

Somit ergibt sich die theoretische Leistungsfähigkeit eines Produktionsprozesses (d.h. die Leistungsfähigkeit, die der Produktionsprozess erbringen könnte, wenn er nicht auf einen Vorgängerprozess warten muss) zu:

$$theoretische\ Leistung = \frac{Losgröße}{Prozessdauer} \left[\frac{Einheiten}{h} \right]$$

Da die Prozessdauer im Nenner der Gleichung ist, nimmt die theoretische Leistungsfähigkeit mit kleineren Prozessdauern zu und mit großen Prozessdauern entsprechend ab. Hieraus folgt, dass bei einem progressiven Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Losgröße und der Prozessdauer ein regressiver Zusammenhang zwischen Losgröße und Leistungsfähigkeit entsteht. Für einen degressiven Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Losgröße folgt allerdings ebenfalls ein degressiver Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Losgröße. Beide Zusammenhänge sind in Abbildung 8-2 dargestellt.

Abbildung 8-3 stellt exemplarisch den umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Leistungsfähigkeit für normalverteilte Prozessdauern dar. Aus der höchsten Prozessdauer resultiert die niedrigste Leistungsfähigkeit und aus der niedrigsten Prozessdauer die höchste Leistungsfähigkeit (vgl. rote Pfeile).

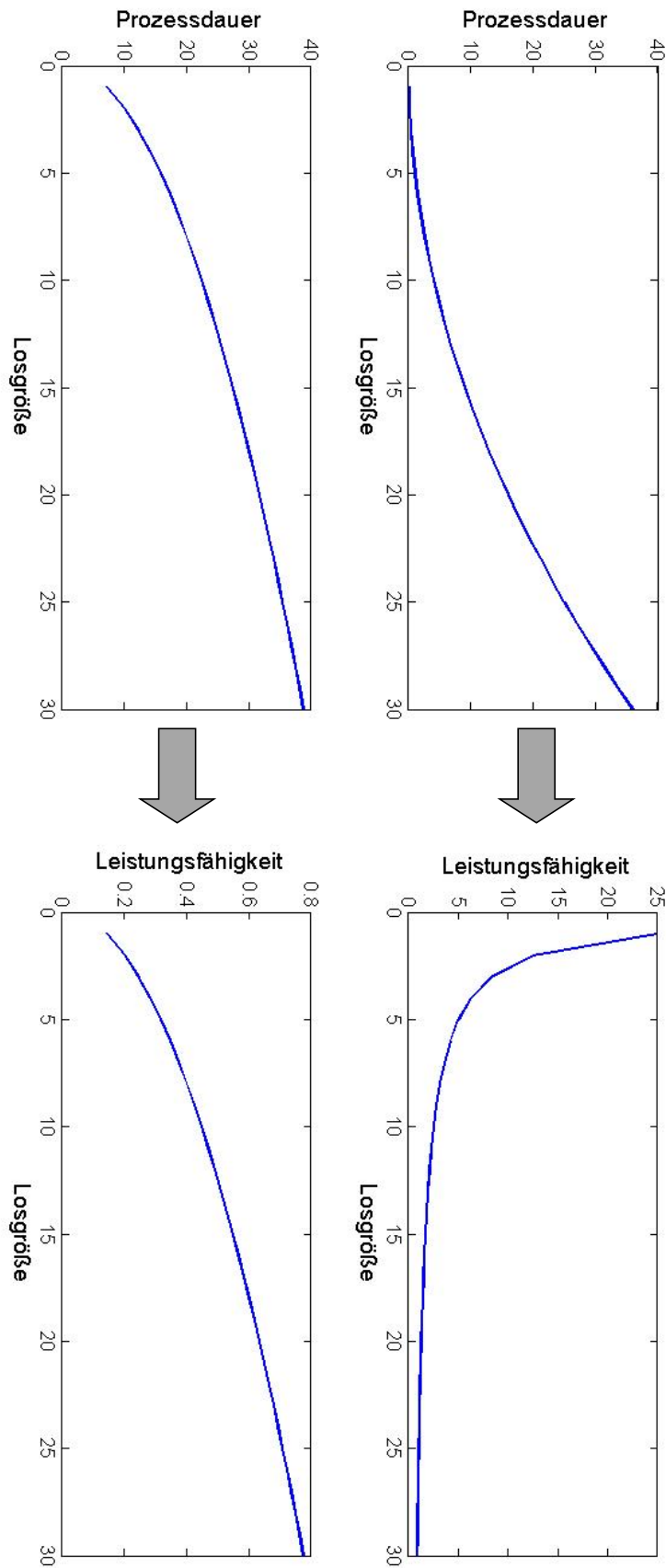


Abbildung 8-2: Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Losgröße und Leistungsfähigkeit und Losgröße

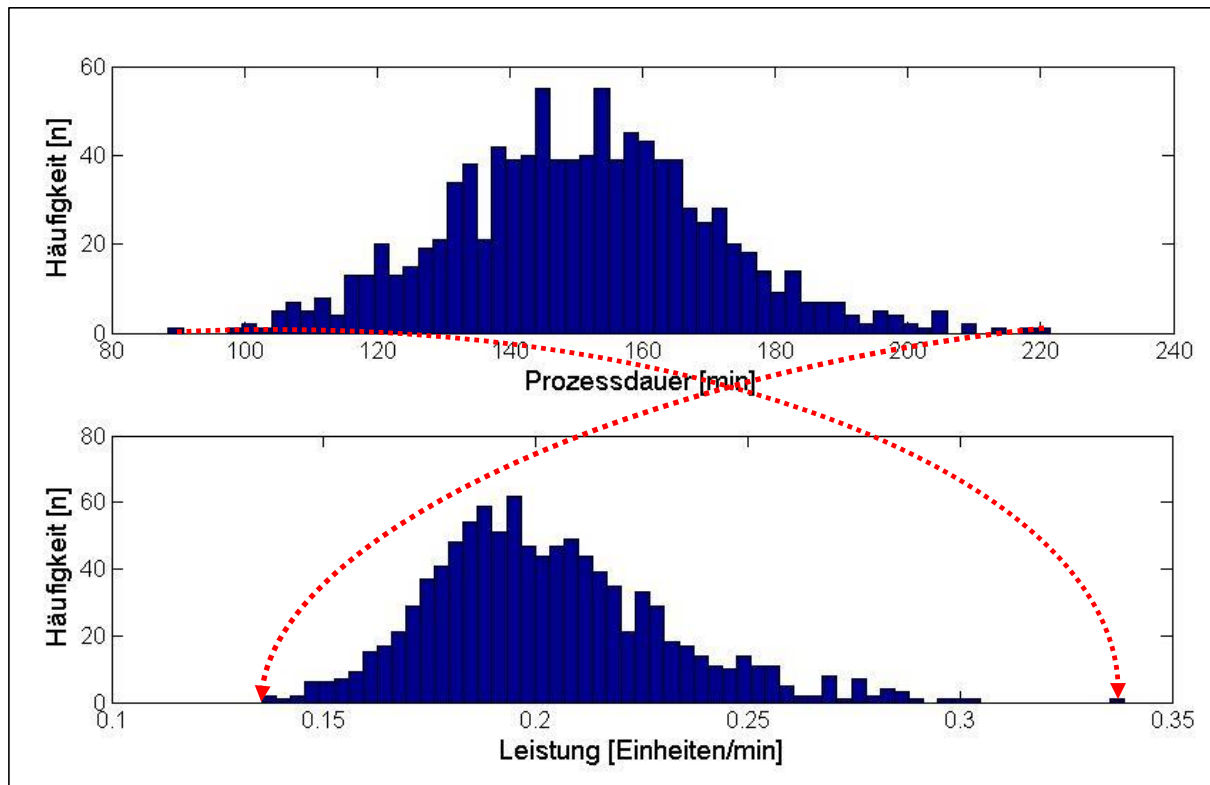


Abbildung 8-3: Zusammenhang zwischen Prozessdauer und Leistung für eine Losgröße von 30 Einheiten

Anhang 3 - Quellcode: Variante 1

```
t=1 %Losgröße

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000,20/t,400/t, 80/sqrt(t)] %
Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean, std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000,20/t,300/t, 60/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000,20/t,300/t, 80/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000,20/t,500/t,100/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:10000
V_GES=[]
D=[]

for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produktio
nsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b))
;

V_Fertig_B(y,b)=Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,
b);

if b==1
V_Fertig_C(y,b)=Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,
b);
else
V_Fertig_C(y,b)=V_Fertig_C(y,(b-
1))+Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b);
end

V_GES(b)=D(b);

if b==1
V_Fertig(y,b)=V_GES(b);
else
V_Fertig(y,b)= V_GES(b)+V_Fertig_C(y,(b-1));
end

end
end

subplot(2,2,1)
hist(V_Fertig(:,1),60)
subplot(2,2,2)
hist(V_Fertig(:,2),60)
subplot(2,2,3)
hist(V_Fertig(:,3),60)
subplot(2,2,4)
hist(V_Fertig(:,4),60)
```

Weitere aufgerufene Funktionen:

```
function [tfh] = Verteilung_norm_begrenzt (o,u,Mittelwert
,Standardabweichung)
    % Fahrzeiten (normalverteilt) für Baumaschinen
    Untergrenze = u;
    Obergrenze = o;
    % =====

    tfh = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    while (tfh <Untergrenze | tfh >Obergrenze);
        tfh = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    end
    tfh = round (tfh);%Spielzeit
end
```


Anhang 4 - Quellcode: Variante 2

```
t=1 %Losgröße

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000,20/t,400/t, 80/sqrt(t)] %
Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean, std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000,20/t,300/t, 60/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000,20/t,300/t, 80/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000,20/t,500/t,100/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:10000
V_GES=[];

for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produktio
nsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b))
;
V_GES(b)=D(b);

    if b==1
V_Fertig(y,b)=V_GES(b);
    else
V_Fertig(y,b)= V_GES(b)+V_Fertig(y, (b-1));
    end

end

end

subplot(2,2,1)
hist(V_Fertig(:,1),60)
subplot(2,2,2)
hist(V_Fertig(:,2),60)
subplot(2,2,3)
hist(V_Fertig(:,3),60)
subplot(2,2,4)
hist(V_Fertig(:,4),60)
```

Anhang 5 - Quellcode: Variante 3

```
t=3 %Losgröße

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000,20/t,400/t, 80/sqrt(t)] %
Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean, std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000,20/t,300/t, 60/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000,20/t,300/t, 80/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000,20/t,500/t,100/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

Controlle=[]
for y=1:10000
    V_GES=[]
    D=[]
    V_Fertig=[]
    for f=1:1:t

        for b=1:1:x %Produktionsprozesse

            D(f,b)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produktionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b));

            if b==1
                if f==1

                    V_Fertig_C(f,b)=Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b);
                else
                    V_Fertig_C(f,b)= V_Fertig_C((f-1),b)+Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b);
                end
            else
                if f==1
                    V_Fertig_C(f,b)=V_Fertig_C(f, (b-1))+Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b);
                else
                    V_Fertig_C(f,b)=max(V_Fertig_C(f, (b-1))+Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b),V_Fertig_C((f-1),b)+Daten_Produktionsprozess(3,b)+4*Daten_Produktionsprozess(4,b));
                end
            end

            V_GES(f,b)=D(f,b);

            if b==1&&f==1
                V_Fertig(f,b)=V_GES(f,b);

            elseif b>1&&f==1
                V_Fertig(f,b)= V_GES(f,b)+V_Fertig_C(f, (b-1));

            elseif b==1&&f>1
                V_Fertig(f,b)= V_GES(f,b)+V_Fertig_C((f-1),b);
            else
                V_Fertig(f,b)= max(V_GES(f,b)+V_Fertig_C((f-1),b),V_GES(f,b)+V_Fertig_C(f, (b-1)));
            end
        end
    end
end
```

```
end  
end
```

```
Controlle=vertcat(Controlle, D);  
V_Fertig_ges(y,:)=V_Fertig(f,:);
```

```
end
```

```
subplot(2,2,1)  
hist(V_Fertig_ges(:,1),60)  
subplot(2,2,2)  
hist(V_Fertig_ges(:,2),60)  
subplot(2,2,3)  
hist(V_Fertig_ges(:,3),60)  
subplot(2,2,4)  
hist(V_Fertig_ges(:,4),60)
```

Anhang 6 - Quellcode: Variante 4

6.1 Grafik

```
for cv2=[0.05 0.1 0.2 0.3]
t=3

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,20/t,400/t, 80/sqrt(t)] %
Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean, std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,20/t,300/t, 60/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,20/t,300/t, 80/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,20/t,500/t, 100/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:10000
V_Control=[];
for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b,:)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produktionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b));
V_GES(d,b)=max(D(b,:));

end
end

for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for f=1:1:x %Einzelne Arbeitsstation

    if d==1
        if f==1
            V_Control(d,f)=V_GES(d,f);
        else
            V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f);
        end
    else
        if (f>1)
            V_Control(d,f)=max(V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f));
        else
            V_Control(d,f)= V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f);
        end
    end

end

end

V_Fertig (y,:)= V_Control(d,:);

end
end

subplot (2,2,1)
hist(V_Fertig (:,1),60)
subplot (2,2,2)
hist(V_Fertig(:,2),60)
```

```
subplot (2,2,3)
hist(V_Fertig(:,3),60)
subplot (2,2,4)
hist(V_Fertig(:,4),60)
```

6.2 Tabelle

```
for cv2=[0.05 0.1 0.2 0.3]
for t=[1 5 10 15 20 25 30]

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)] % Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean,
std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:10000
V_Control=[];
for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b,:)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produkt
ionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b
));
V_GES(d,b)=max(D(b,:));

end
end

for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for f=1:1:x %Einzelne Arbeitsstation

    if d==1
        if f==1
            V_Control(d,f)=V_GES(d,f);
        else
            V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f);
        end
    else
        if (f>1)
            V_Control(d,f)=max(V_Control((d-
1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f));
        else
            V_Control(d,f)= V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f);
        end
    end

end

end

V_Fertig (y,:)= V_Control(d,:);

%DLZ-Messung
```

```

for d=1:1:t
    if d==1
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-(V_Control(d,1)-V_GES(d,1));
    end
end
%Through-Put
for d=1:1:t
    if d==1
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-V_Control((d-1),x);
    end

%mean und std von DLZ bzw. TH gibt Auskunft über Qualität
end
end

for a=1:t
    if a==1
        A=DLZ_Fertig(:,1);
        B=TH_Fertig(:,1);
    else
        A=vertcat(A,DLZ_Fertig(:,a));
        B=vertcat(B,TH_Fertig(:,a));
    end
end
std1_TH1=mean(TH_Fertig);
std1_TH=std(std1_TH1);
std2_TH=std(B);
mean_DLZ=mean(A);
mean_TH=mean(B);

mean_Fertig=mean(V_Fertig(:,x));
std_Fertig=std(V_Fertig(:,x));

if cv2==0.05&&t==1
    V_std1_TH=std1_TH;
    V_std2_TH=std2_TH;
    V_mean_DLZ=mean_DLZ;
    V_mean_TH=mean_TH
    V_Fertig_mean=mean_Fertig;
    V_Fertig_std=std_Fertig;

else

V_std1_TH=vertcat(V_std1_TH,std1_TH);

V_std2_TH=vertcat(V_std2_TH,std2_TH);
V_mean_DLZ=vertcat(V_mean_DLZ,mean_DLZ);
V_mean_TH=vertcat(V_mean_TH, mean_TH);
V_Fertig_mean=vertcat(V_Fertig_mean,mean_Fertig);
V_Fertig_std=vertcat(V_Fertig_std,std_Fertig);
end
end
end

Uebersicht=horzcat(V_mean_DLZ, V_mean_TH,
V_std2_TH,V_Fertig_mean,V_Fertig_std)

xlswrite('Variante 4-Simulationsergebnisse.xls', Uebersicht,'c2:g29');

```

Weitere Simulationsergebnisse

Angenommene Verteilungen:

```
Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,20/t,500/t,
((sqrt(cv2)*500))/sqrt(t)] % Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean,
std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,20/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,20/t,500/t,
((sqrt(cv2)*500))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,20/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
```

Varianz der Prozessdauern	c_L [-]	μ -DLZ [ZE]	μ -ZfZ [ZE]	σ -ZfZ [ZE]	μ_{ges} [ZE]	σ_{ges} [ZE]
CV ² =0.05	1	1799,41	1799,41	202,90	1799,41	202,90
	5	431,75	176,57	117,12	882,83	97,44
	10	260,11	75,88	52,65	758,85	69,82
	15	196,28	47,26	32,65	708,91	56,02
	20	161,41	34,04	23,33	680,80	48,10
	25	139,42	26,49	17,98	662,31	42,62
	30	124,45	21,59	14,51	647,80	39,03
CV ² =0.1	1	1803,40	1803,40	282,27	1803,40	282,27
	5	460,28	185,27	124,77	926,36	113,30
	10	276,63	78,75	55,34	787,47	74,80
	15	207,69	48,67	33,99	729,99	58,61
	20	170,65	34,81	23,99	696,11	50,23
	25	147,06	27,03	18,39	675,85	44,15
	30	130,26	21,96	14,80	658,80	40,08
CV ² =0.2	1	1812,94	1812,94	369,84	1812,94	369,84
	5	484,49	192,60	131,30	963,01	120,74
	10	288,86	80,52	57,10	805,20	76,85
	15	216,42	49,53	34,71	742,91	59,74
	20	175,41	35,27	24,36	705,46	50,57
	25	150,36	27,26	18,65	681,61	44,17
	30	133,36	22,15	14,91	664,53	40,18
CV ² =0.3	1	1844,68	1844,68	423,49	1844,68	423,49
	5	494,36	195,44	133,84	977,18	125,34
	10	292,73	81,25	57,57	812,49	77,83
	15	218,21	49,77	34,87	746,59	59,98
	20	178,16	35,49	24,50	709,83	50,99
	25	152,37	27,36	18,69	684,00	44,92
	30	134,75	22,22	15,00	666,70	40,53

Tabelle 8-1: Zusätzliche Simulationsergebnisse von Variante 4³⁹⁴

³⁹⁴ CV = Variationskoeffizient [-]; c_L = Losgröße [-]; μ -DLZ = Mittelwert der Durchlaufzeiten [Zeiteinheit]; μ -ZfZ = Mittelwert der Zwischenfertigungszeiten [Zeiteinheit]; σ -ZfZ = Standardabweichung der

Angenommene Verteilungen:

```

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,20/t,300/t,
((sqrt(cv2)*300))/sqrt(t)] % Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean,
std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,20/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,20/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,20/t,300/t,
((sqrt(cv2)*300))/sqrt(t)]

```

Varianz der Prozessdauern	c_L [-]	μ -DLZ [ZE]	μ -ZfZ [ZE]	σ -ZfZ [ZE]	μ_{ges} [ZE]	σ_{ges} [ZE]
CV ² =0.05	1	1397,21	1397,21	157,35	1397,21	157,35
	5	379,98	140,96	92,63	704,78	82,44
	10	254,31	63,73	44,13	637,33	64,78
	15	205,62	41,29	28,64	619,37	54,45
	20	176,17	30,49	21,19	609,80	47,61
	25	155,40	24,07	16,62	601,85	42,44
	30	139,95	19,92	13,66	597,62	39,24
CV ² =0.1	1	1402,78	1402,78	222,35	1402,78	222,35
	5	416,10	154,74	104,09	773,68	101,95
	10	275,02	70,05	49,45	700,50	71,37
	15	214,94	44,76	31,66	671,40	58,74
	20	179,85	32,59	22,87	651,85	49,71
	25	155,53	25,55	17,71	638,69	44,02
	30	138,73	20,97	14,39	628,99	39,51
CV ² =0.2	1	1427,70	1427,70	300,14	1427,70	300,14
	5	453,95	171,03	117,56	855,13	118,62
	10	287,69	75,30	53,87	752,96	76,58
	15	219,00	47,20	33,33	707,93	59,70
	20	180,65	34,04	23,86	680,76	50,66
	25	155,05	26,48	18,31	661,95	44,46
	30	137,77	21,60	14,74	648,05	40,60
CV ² =0.3	1	1468,85	1468,85	351,42	1468,85	351,42
	5	471,66	178,85	122,84	894,27	121,50
	10	293,26	77,59	55,43	775,87	76,28
	15	221,12	48,20	34,12	723,04	59,29
	20	180,26	34,58	24,19	691,67	50,92
	25	155,36	26,82	18,43	670,48	44,79
	30	137,29	21,83	14,87	655,02	40,41

Tabelle 8-2: Zusätzliche Simulationsergebnisse von Variante 4³⁹⁵

Zwischenfertigungszeiten [Zeiteinheit]; μ_{ges} = Mittelwert der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit]; σ_{ges} = Standardabweichung der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit].

³⁹⁵ CV = Variationskoeffizient [-]; c_L = Losgröße [-]; μ -DLZ = Mittelwert der Durchlaufzeiten [Zeiteinheit]; μ -ZfZ = Mittelwert der Zwischenfertigungszeiten [Zeiteinheit]; σ -ZfZ = Standardabweichung der

Anhang 7 - Quellcode: Variante 5

```
for cv2=[0.05 0.1 0.2 0.3]
for t=[1 5 10 15 20 25 30]

Puffer(1)=1 %Puffer zwischen Prozess 1 und 2
Puffer(2)=1 %Puffer zwischen Prozess 2 und 3
Puffer(3)=1 %Puffer zwischen Prozess 3 und 4
%manuelles Hinzufügen /ist immer Puffer+Produktionsplatz

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)] % Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean,
std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:1000
V_Control=[];
for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b,:)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produktionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b));
V_GES(d,b)=max(D(b,:));

end
end

for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for f=1:1:x %Einzelne Arbeitsstation
if d==1
if f==1
V_Control(d,f)=V_GES(d,f);
else
V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f);
end
else

if(f>1)
V_Control(d,f)=max(V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f));
else
V_Control(d,f)= V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f);
end

if(f<x)
```

Zwischenfertigtstellungszeiten [Zeiteinheit]; μ_{ges} = Mittelwert der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit]; σ_{ges} = Standardabweichung der Fertigstellungstermine [Zeiteinheit].

```
        if (d>Puffer(f)+1)&&(V_Control((d-Puffer(f)-1),(f+1))>V_Control((d-1),f));
            if(f>1)
                V_Control1=[V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f),V_Control((d-Puffer(f)-1),(f+1))+V_GES(d,f)];
                V_Control(d,f)=max(V_Control1);
            else
                V_Control(d,f)=max(V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control((d-Puffer(f)-1),(f+1))+V_GES(d,f));
            end
            else
                %tue nichts
            end
        end
    end
end
V_Fertig (y,:)= V_Control(d,:);

%DLZ-Messung
for d=1:1:t
    if d==1
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-(V_Control(d,1)-V_GES(d,1));
    end
end
%Through-Put
for d=1:1:t
    if d==1
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-V_Control((d-1),x);
    end
end

%mean und std von DLZ bzw. TH gibt Auskunft über Qualität
end
end

for a=1:t
    if a==1
        A=DLZ_Fertig(:,1);
        B=TH_Fertig(:,1);
    else
        A=vertcat(A,DLZ_Fertig(:,a));
        B=vertcat(B,TH_Fertig(:,a));
    end
end
std1_TH1=mean(TH_Fertig);
std1_TH=std(std1_TH1);
std2_TH=std(B);
mean_DLZ=mean(A);
mean_TH=mean(B);

mean_Fertig=mean(V_Fertig(:,x));
std_Fertig=std(V_Fertig(:,x));

if cv2==0.05&&t==1

V_std1_TH=std1_TH;
```

```
V_std2_TH=std2_TH;

V_mean_DLZ=mean_DLZ;
V_mean_TH=mean_TH

V_Fertig_mean=mean_Fertig;
V_Fertig_std=std_Fertig;

else

V_std1_TH=vertcat(V_std1_TH,std1_TH);
V_std2_TH=vertcat(V_std2_TH,std2_TH);

V_mean_DLZ=vertcat(V_mean_DLZ,mean_DLZ);
V_mean_TH=vertcat(V_mean_TH, mean_TH);

V_Fertig_mean=vertcat(V_Fertig_mean,mean_Fertig);
V_Fertig_std=vertcat(V_Fertig_std,std_Fertig);
end
end
end

Uebersicht=horzcat(V_mean_DLZ, V_mean_TH,
V_std2_TH,V_Fertig_mean,V_Fertig_std)

xlswrite('Variante 5-Simulationsergebnisse-1.xls', Uebersicht,'c2:g29');
```

Anhang 8 - Quellcode: Variante 6

```
for cv2=[0.05 0.1 0.2 0.3]
for t=[1 5 10 15 20 25 30]

Puffer=3
%manuelles Hinzufügen /sind immer Puffer+Produktionsplatz

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)] % Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean,
std]
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000/t,200/t,400/t,
((sqrt(cv2)*400))/sqrt(t)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:1000
V_Control=[];
for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b,:)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produkt
ionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b
));
V_GES(d,b)=max(D(b,:));
end
end
for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for f=1:1:x %Einzelne Arbeitsstation
    if d==1
        if f==1
            V_Control(d,f)=V_GES(d,f);
        else
            V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f);
        end
    else
        if(f>1)
            V_Control(d,f)=max(V_Control((d-
1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f));
        else
            V_Control(d,f)= V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f);
        end

        if f==1&&(d>Puffer)&&(V_Control((d-Puffer),x)>V_Control((d-1),1));

            V_Control(d,1)=V_Control((d-Puffer),x)+V_GES(d,f);
        end
    end
end
end

V_Fertig (y,:)= V_Control(d,:);
%DLZ-Messung
for d=1:1:t
    if d==1
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    end
end
end
```

```
        else
            DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-(V_Control(d,1)-V_GES(d,1));
        end
    end
    %Through-Put
    for d=1:1:t
        if d==1
            TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
        else
            TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-V_Control((d-1),x);
        end
        %mean und std von DLZ bzw. TH gibt Auskunft über Qualität
    end
end

for a=1:t
    if a==1
        A=DLZ_Fertig(:,1);
        B=TH_Fertig(:,1);
    else
        A=vertcat(A,DLZ_Fertig(:,a));
        B=vertcat(B,TH_Fertig(:,a));
    end
end
std1_TH1=mean(TH_Fertig);
std1_TH=std(std1_TH1);
std2_TH=std(B);
mean_DLZ=mean(A);
mean_TH=mean(B);

mean_Fertig=mean(V_Fertig(:,x));
std_Fertig=std(V_Fertig(:,x));

if cv2==0.05&&t==1

    V_std1_TH=std1_TH;
    V_std2_TH=std2_TH;
    V_mean_DLZ=mean_DLZ;
    V_mean_TH=mean_TH

    V_Fertig_mean=mean_Fertig;
    V_Fertig_std=std_Fertig;

else

    V_std1_TH=vertcat(V_std1_TH,std1_TH);
    V_std2_TH=vertcat(V_std2_TH,std2_TH);
    V_mean_DLZ=vertcat(V_mean_DLZ,mean_DLZ);
    V_mean_TH=vertcat(V_mean_TH, mean_TH);

    V_Fertig_mean=vertcat(V_Fertig_mean,mean_Fertig);
    V_Fertig_std=vertcat(V_Fertig_std,std_Fertig);
end
end
end

Uebersicht=horzcat(V_mean_DLZ, V_mean_TH,
V_std2_TH,V_Fertig_mean,V_Fertig_std)

xlswrite('Variante 6-Simulationsergebnisse-1.xls', Uebersicht,'c2:g29');
```

Anhang 9 - Quellcode: Pull-Mechanismus für Leerfahrzeuge

```
reale_Zwischenankunftszeiten_Linie1=[242,25,7,87,99,203,92,186,330,137,589,
126,18,118,48,202,102,12] '

reale_Zwischenankunftszeiten_Linie2=[837,12,120,13,5,101,219,20,46,33,72,16
2,149,6,4,165,84,193,220,314,14,51,149] '

gemessener_Mittelwert_Zwischenankunftszeiten1=mean(reale_Zwischenankunftsze
iten_Linie1)
gemessener_Mittelwert_Zwischenankunftszeiten2=mean(reale_Zwischenankunftsze
iten_Linie2)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Löschen der Speichervektoren/-matrizen-----

ZZ_B1_ges=[]; %Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 1
ZZ_B2_ges=[]; %Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 2

ZZ_WB1_ges=[]; %Zwischenankunftszeiten an Bagger 1
ZZ_WB2_ges=[]; %Zwischenankunftszeiten an Bagger 2

Zwischenankunftszeiten_Linie1=[];
%Zwischenankunftszeiten der LKW von Linie 1 am Startpunkt (für Validierung)
Zwischenankunftszeiten_Linie2=[];
%Zwischenankunftszeiten der LKW von Linie 2 am Startpunkt (für Validierung)

M_Std_ges=[]
i_std=0

%-----Ende löschen der Speichervektoren/-matrizen-----

%-----Analyse des Einflusses der Reduktion der Standardabweichungen----
for t_std=1:0.5:4

    i_std=i_std+1

    %--Ausblenden des for-Loops zur Analyse bestimmter Simulationsdurchläufe--

    for x=1:1:500 % 500= Anzahl der Simulationsdurchläufe

        %%%%%%%%%%Ende Setup Simulationswiederholungen %%%%%%%%%%

        %%%%%%%%%%Setup der einzelnen Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%

        %-----Löschen der Speichervektoren/-matrizen-----
        TW_LKW_WS_ges=[]; %Warteschlange an zuordnungspunkt bei Kanbansteuerung
        TW_LKW_B2_ges=[]; %Wartezeit der LKW an Bagger 2
        TW_LKW_B1_ges=[]; %Wartezeit der LKW an Bagger 1

        ZZ_B1=[]; %Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 1
        ZZ_B2=[]; %Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 2

        Zwischenankunftszeiten_G1=[];
        %Zwischenankunftszeiten der LKW von Linie 1 am Startpunkt (für Validierung)
        Zwischenankunftszeiten_G2=[];
```

```
%Zwischenankunftszeiten der LKW von Linie 2 am Startpunkt (für Validierung)

ZZ_B1_ges_neu=[]
%Übergabevektor zur Speicherung der Zwischenabfahrtszeiten Bagger 1

ZZ_B2_ges_neu=[]
%Übergabevektor zur Speicherung der Zwischenabfahrtszeiten Bagger 2

ZZ_WB1_neu_ges=[]
%Übergabevektor zur Speicherung der Zwischenankunftszeiten Bagger 1

ZZ_WB2_neu_ges=[]
%Übergabevektor zur Speicherung der Zwischenankunftszeiten Bagger 2

ZZ_WB1=[];%Zwischenankunftszeiten an Bagger 1
ZZ_WB2=[];%Zwischenankunftszeiten an Bagger 2

LKW_WS1=[];%Warteschlange Fahrstrecke zu Bagger 1
LKW_WS2=[];%Warteschlange Fahrstrecke zu Bagger 2

WB1=[];%Warteschlange Bagger 1
WB2=[];%Warteschlange Bagger 2

LKW_WS1R=[];%Warteschlange Rückfahrt von Bagger 1 zu Start
LKW_WS2R=[];%Warteschlange Rückfahrt von Bagger 2 zu Start

LKW_E=[];%Warteschlange von Start zu Entladestelle

LKW_ENT=[];%Warteschlange beim Entladen

LKW_ER=[];%Warteschlange Rückfahrt von Entladestelle zu Start

TW_B1=0;%Wartezeit von Bagger 1
TW_B2=0;%Wartezeit von Bagger 2

A_STD_V1=[]
A_STD_V2=[]

M_Std=[]

Zwischenankunftszeiten=[];
%Zwischenankunftszeiten aller LKW an Startpunkt (für Validierung)

%-----Ende Löschung Speichervektoren/-matrizen-----

%-----Setup der LKW-Zuordnungen und LKW-Speichervektoren/-matrizen-----

LKW_Anzahl_Linie1=9;%LKW-Anzahl für Linie 1
LKW_Anzahl_Linie2=12;%LKW-Anzahl für Linie 2

LKW_M1=[1:1:LKW_Anzahl_Linie1]';
LKW_M2=[(LKW_Anzahl_Linie1+1):1:(LKW_Anzahl_Linie2+LKW_Anzahl_Linie1)]';

for i=1:1:LKW_Anzahl_Linie1;
LKW_M1(i,2)=1;
end
```

```

for i=1:1:LKW_Anzahl_Linie2;
LKW_M2(i,2)=2;
end

LKW_WS=vertcat(LKW_M1, LKW_M2);%Erstellte Warteschlange an Startpunkt

S_TW_LKW=size(LKW_WS);
TW_LKW=horzcat(LKW_WS(:,1),zeros(S_TW_LKW(1,1),1));%Wartezeiten der LKW

LKW_WS(:,3)=-100;
%"-100" ist eine eingeführte Zuordnungsvariable, die angibt, ob der LKW bei
Kanbansteuerung schon zugeordnet wurde

TW_LKW_WS_ges=horzcat(LKW_WS(:,1),zeros(S_TW_LKW(1,1),1));
%Wartezeiten der LKW am Zuordnungspunkt bei Kanbansteuerung

TW_LKW_B2_ges=horzcat(LKW_WS(:,1),zeros(S_TW_LKW(1,1),1));
%Wartezeiten der LKW an Bagger 2

TW_LKW_B1_ges=horzcat(LKW_WS(:,1),zeros(S_TW_LKW(1,1),1));
%Wartezeiten der LKW an Bagger 1

%-----Ende Setup der LKW-----

%-----Programm Setup -----
CX=0;    %Ausgangssituation für Kanbansteuerung

t=0;     %Zeitstrahl

Kanban=0 %[1,0] Kanban ein=1, aus=0

%t_std=2 %Teiler für Reduktion der Standardabweichungen

%-----Ende Programm Setup -----

%%%%%%%%%%Ende Setup der einzelnen Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%Start der einzelnen Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%%

while (t<29000)    %29000=ca. 8*60*60 entspricht ca. einem Arbeitstag

t=t+1;

%-----Kanbansteuerung-----

if(Kanban==1);
    S_LKW_WS=size(LKW_WS);
    if (S_LKW_WS(1,1)>0);

        for i=1:1:S_LKW_WS(1,1);
            LKW_WS(i,3)=-200;
        end

        C11=size(LKW_WS1);
        C12=size(WB1);

        C21=size(LKW_WS2);

```



```
C22=size(WB2);

C1=C11(1,1)+C12(1,1);
C2=C21(1,1)+C22(1,1);

if (C1<3 && CX==0 );

    LKW_WS(1,2)=1;
    LKW_WS(1,3)=-100;

    CX=1;

elseif (C2<4 && CX==1);

    LKW_WS(1,2)=2;
    LKW_WS(1,3)=-100;

    CX=0;

elseif (C1<3 );

    LKW_WS(1,2)=1;
    LKW_WS(1,3)=-100;

    CX=1;

elseif (C2<4 );

    LKW_WS(1,2)=2;
    LKW_WS(1,3)=-100;

    CX=0;

end

rcol=any(LKW_WS(:,3)==-200,2);
if (sum(rcol)>0);
    TW_LKW_WS=LKW_WS;
    rco2=any(LKW_WS(:,3)==-100,2);
    TW_LKW_WS(rco2,:)=[];

    S_TW_LKW_WS=size(TW_LKW_WS);
    for i=1:1:S_TW_LKW_WS(1,1);

        TW_LKW(TW_LKW_WS(i,1),2)=TW_LKW(TW_LKW_WS(i,1),2)+1 ;

        TW_LKW_WS_ges(TW_LKW_WS(i,1),2)=TW_LKW_WS_ges(TW_LKW_WS(i,1),2)+1;

    end

end

if (LKW_WS(1,2)==1 && LKW_WS(1,3)==-100);

    LKW_WS1_neu=LKW_WS(1,:);

    S_LKW_WS1=size(LKW_WS1);
    if (S_LKW_WS1(1,1)==0);
```

```
LKW_WS1=LKW_WS1_neu;

elseif (S_LKW_WS1(1,1)>0);

    LKW_WS1=vertcat(LKW_WS1, LKW_WS1_neu);

end

elseif(LKW_WS(1,2)==2 && LKW_WS(1,3)==-100);
    LKW_WS2_neu=LKW_WS(1,:);

    S_LKW_WS2=size(LKW_WS2);
    if(S_LKW_WS2(1,1)==0);

        LKW_WS2=LKW_WS2_neu;

    elseif (S_LKW_WS2(1,1)>0);

        LKW_WS2=vertcat(LKW_WS2, LKW_WS2_neu);

    end
end
rc=any(LKW_WS(:,3)==-100,2);
LKW_WS(rc,:)=[];

end
end

%-----Ende Kanbansteuerung-----

%-----Feste LKW-Zuordnung-----

if(Kanban==0)

    S_LKW_WS=size(LKW_WS);
    if (S_LKW_WS(1,1)>0);

        for i=1:1:S_LKW_WS(1,1);

            T_Z(i,1)=t;

            T_LKW(i,1)=LKW_WS(i,1);

            T_Z_G=horzcat(T_LKW, T_Z);

        end

        Zwischenankunftszeiten=vertcat(Zwischenankunftszeiten,T_Z_G);

        T_Z=[];
        T_LKW=[];

        LKW_WS1_neu=LKW_WS ;
        r1=any(LKW_WS1_neu(:,2)==2,2);
        LKW_WS1_neu(r1,:)=[];

        S_LKW_WS1=size(LKW_WS1);
```

```
    if (S_LKW_WS1(1,1)==0);

        LKW_WS1=LKW_WS1_neu;

    elseif (S_LKW_WS1(1,1)>0);

        LKW_WS1=vertcat(LKW_WS1, LKW_WS1_neu);

    end

    LKW_WS2_neu=LKW_WS2;
    r2=any(LKW_WS2_neu(:,2)==1,2);
    LKW_WS2_neu(r2,:)=[];

    S_LKW_WS2=size(LKW_WS2);
    if (S_LKW_WS2(1,1)==0);

        LKW_WS2=LKW_WS2_neu;

    elseif (S_LKW_WS2(1,1)>0);

        LKW_WS2=vertcat(LKW_WS2, LKW_WS2_neu);

    end

    LKW_WS=[];

end

end

%-----Ende feste LKW-Zuordnung-----

%-----Warteschlange 1 Hin-----

S_LKW_WS1=size(LKW_WS1);
if (S_LKW_WS1>0);
    for i=1:1:S_LKW_WS1(1,1);

        if (LKW_WS1(i,3)==-100);
            LKW_WS1(i,3)=int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt (110,40,55, (20/t_std)));

            if (i>1);
                if (LKW_WS1(i,3)<(LKW_WS1(i-1,3)+4));
                    LKW_WS1(i,3)=LKW_WS1(i-1,3)+4;
                    %3 Sekunden minimaler Abstand
                end
            end
            LKW_WS1(i,3)=LKW_WS1(i,3)-1;

        elseif (LKW_WS1(i,3)>0);

            LKW_WS1(i,3)=LKW_WS1(i,3)-1;

        end

    end
end
end
```

```
S_LKW_WS1=size(LKW_WS1);
if(S_LKW_WS1(1,1)>0);

    r1=any(LKW_WS1(:,3)==0,2);

    if (sum(r1)==1);

        WB1_neu=LKW_WS1(r1,:);
        S_WB1=size(WB1);

        ZZ_WB1_neu=horzcat(LKW_WS1(1,1),t);
        %Zwischenankunftszeiten an Bagger1
        ZZ_WB1=vertcat(ZZ_WB1, ZZ_WB1_neu);

        if(S_WB1(1,1)==0);

            WB1_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (120,75,93,(10/t_std)));
            WB1=WB1_neu;

            elseif (S_WB1(1,1)>0);

                WB1_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (120,75,93,(10/t_std)));
                WB1=vertcat(WB1,WB1_neu);
            end
        end

        LKW_WS1(r1,:)=[];

end

%-----Ende Warteschlange 1 Hin-----

%-----Warteschlange 2 Hin-----

S_LKW_WS2=size(LKW_WS2);
if(S_LKW_WS2(1,1)>0);
    for i=1:1:S_LKW_WS2(1,1);

        if(LKW_WS2(i,3)==-100);
            LKW_WS2(i,3)=int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt (350,120,150,(80/t_std)));

            if(i>1);
                if(LKW_WS2(i,3)<(LKW_WS2(i-1,3)+4));
                    LKW_WS2(i,3)=LKW_WS2(i-1,3)+4;
                    %3 Sekunden minimaler Abstand
                end
            end
            LKW_WS2(i,3)=LKW_WS2(i,3)-1;

            elseif(LKW_WS2(i,3)>0);
                LKW_WS2(i,3)=LKW_WS2(i,3)-1;

            end
        end
    end
end
```

```
S_LKW_WS2=size(LKW_WS2);
if(S_LKW_WS2(1,1)>0);

    r2=any(LKW_WS2(:,3)==0,2);

    if (sum(r2)==1);

        WB2_neu=LKW_WS2(r2,:);
        S_WB2=size(WB2);

        ZZ_WB2_neu=horzcat(LKW_WS2(1,1),t);
        %Zwischenankunftszeiten an Bagger2

        ZZ_WB2=vertcat(ZZ_WB2, ZZ_WB2_neu);

        if(S_WB2(1,1)==0);

            WB2_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (1000,50,74,(20/t_std)));
            WB2=WB2_neu;

            elseif (S_WB2(1,1)>0);

            WB2_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (1000,50,74,(20/t_std)));
            WB2=vertcat(WB2,WB2_neu);
            end
        end

        LKW_WS2(r2,:)=[];

end

%-----Ende Warteschlange 2 Hin-----

%-----Warteschlange Bagger 1-----

S_WB1=size(WB1);

if(S_WB1(1,1)>1) ;
    for i=2:1:S_WB1(1,1);

        TW_LKW(WB1(i,1),2)=TW_LKW(WB1(i,1),2)+1 ;

        TW_LKW_B1_ges(WB1(i,1),2)=TW_LKW_B1_ges(WB1(i,1),2)+1;
    end

end

if(S_WB1(1,1)>0);

    WB1(1,3)=WB1(1,3)-1;

    r1=any(WB1(1,3)==0,2);

    if (sum(r1)==1);

        ZZ_B1_neu=t;
        ZZ_B1=vertcat(ZZ_B1, ZZ_B1_neu);
```

```
LKW_WS1R_neu=WB1(1,:);

S_LKW_WS1R=size(LKW_WS1R);
if(S_LKW_WS1R(1,1)==0);

LKW_WS1R_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt (110,40,55,(20/t_std)));
LKW_WS1R=LKW_WS1R_neu;

elseif (S_LKW_WS1R(1,1)>0);

LKW_WS1R_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt (110,40,55,(20/t_std)));
LKW_WS1R=vertcat(LKW_WS1R,LKW_WS1R_neu);

S_LKW_WS1R=size(LKW_WS1R);

for i=1:1:S_LKW_WS1R(1,1);
    if(i>1)
        ;
        if(LKW_WS1R(i,3)<(LKW_WS1R(i-1,3)+4));
            LKW_WS1R(i,3)=LKW_WS1R(i-1,3)+4 ;
            %3 Sekunden minimaler Abstand
        end
    end
end
end
end
end

WB1(r1,:)=[];

else

    TW_B1=TW_B1+1;%Wartezeiten Bagger
end

%-----Ende Warteschlange Bagger 1-----

%-----Warteschlange Bagger 2-----

S_WB2=size(WB2);

if(S_WB2(1,1)>1);%Wartezeiten LKW
    for i=2:1:S_WB2(1,1);

        TW_LKW(WB2(i,1),2)=TW_LKW(WB2(i,1),2)+1 ;

        TW_LKW_B2_ges(WB2(i,1),2)=TW_LKW_B2_ges(WB2(i,1),2)+1;

    end
end

if(S_WB2(1,1)>0);

    WB2(1,3)=WB2(1,3)-1;

    r2=any(WB2(1,3)==0,2);

    if (sum(r2)==1);
```

```
    ZZ_B2_neu=t;
    ZZ_B2=vertcat(ZZ_B2, ZZ_B2_neu);
    %Zwischenzeiten der Abfahrtszeiten am Bagger

    LKW_WS2R_neu=WB2(1,:);

    S_LKW_WS2R=size(LKW_WS2R);
    if(S_LKW_WS2R(1,1)==0);

    LKW_WS2R_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
    (450,120,170,(80/t_std)));
    LKW_WS2R=LKW_WS2R_neu;

    elseif (S_LKW_WS2R(1,1)>0);

    LKW_WS2R_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
    (450,120,170,(80/t_std)));
    LKW_WS2R=vertcat(LKW_WS2R,LKW_WS2R_neu);

    S_LKW_WS2R=size(LKW_WS2R);

    for i=1:1:S_LKW_WS2R(1,1);
        if(i>1)
            ;
            if(LKW_WS2R(i,3)<(LKW_WS2R(i-1,3)+4));
                LKW_WS2R(i,3)=LKW_WS2R(i-1,3)+4;
                %3 Sekunden minimaler Abstand
            end
        end
    end
end
end
end

WB2(r2,:)=[];

else

    TW_B2=TW_B2+1;%Wartezeiten Bagger
end

%-----Ende Warteschlange Bagger 2-----

%-----Warteschlange Rückfahrt von Beladestelle zu Start 1-----

S_LKW_WS1R=size(LKW_WS1R);
if(S_LKW_WS1R(1,1)>0);

    for i=1:1:S_LKW_WS1R(1,1);

        LKW_WS1R(i,3)=LKW_WS1R(i,3)-1;

    end

    r1=any(LKW_WS1R(1,3)==0,2);

    if (sum(r1)==1);

        LKW_E_neu=LKW_WS1R(1,:);
```

```
S_LKW_E=size(LKW_E);
if(S_LKW_E(1,1)==0);

LKW_E_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)));
%Zweite Fahrzeit entspricht Einbiegen auf öffentliche Straße

LKW_E=LKW_E_neu;

elseif (S_LKW_E(1,1)>0);

LKW_E_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)));
%Fahrzeiten anpassen

LKW_E=vertcat(LKW_E,LKW_E_neu);

S_LKW_E=size(LKW_E);

for i=1:1:S_LKW_E(1,1);
    if(i>1)
        if(LKW_E(i,3)<(LKW_E(i-1,3)+4));
            LKW_E(i,3)=LKW_E(i-1,3)+4 ;
            %3 Sekunden minimaler Abstand
        end
    end
end
end
end
end

LKW_WS1R(r1,:)=[] ;

end

%-----Ende Warteschlange Rückfahrt von Beladestelle zu Start 1-----

%-----Warteschlange Rückfahrt von Beladestelle zu Start 2-----

S_LKW_WS2R=size(LKW_WS2R);
if(S_LKW_WS2R(1,1)>0);

    for i=1:1:S_LKW_WS2R(1,1);

        LKW_WS2R(i,3)=LKW_WS2R(i,3)-1;

    end

    r2=any(LKW_WS2R(1,3)==0,2);

    if (sum(r2)==1);

        LKW_E_neu=LKW_WS2R(1,:);
        S_LKW_E=size(LKW_E);
        if(S_LKW_E(1,1)==0);
```



```

LKW_E_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)));
%Fahrzeiten anpassen

LKW_E=LKW_E_neu;

elseif (S_LKW_E(1,1)>0);

LKW_E_neu(1,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)));
%Fahrzeiten anpassen

LKW_E=vertcat(LKW_E,LKW_E_neu);

S_LKW_E=size(LKW_E);

for i=1:1:S_LKW_E(1,1);
    if(i>1);
        if(LKW_E(i,3)<(LKW_E(i-1,3)+4));
            LKW_E(i,3)=LKW_E(i-1,3)+4 ;
            %3 Sekunden minimaler Abstand
        end
    end
end
end
end

LKW_WS2R(r2,:)=[];

end

%-----Ende Warteschlange Rückfahrt von Beladestelle zu Start 2-----

%-----Fahrt zu Entladestelle und Übergabe an Abladewarteschlange-----

S_LKW_E=size(LKW_E);
if(S_LKW_E(1,1)>0);

    for i=1:1:S_LKW_E(1,1);

        LKW_E(i,3)=LKW_E (i,3)-1;

    end

    r=any(LKW_E(1,3)==0,2);

    if (sum(r)==1);

        LKW_ENT_neu=LKW_E(1,:);
        S_LKW_ENT=size(LKW_ENT);
        if(S_LKW_ENT(1,1)==0);

LKW_ENT_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (120,50,60,(20/t_std)));
%Abladezeiten

LKW_ENT=LKW_ENT_neu;

```

```
elseif (S_LKW_ENT(1,1)>0);

LKW_ENT_neu(1,3)= int32(Beladezeit_norm_begrenzt (120,50,60,(20/t_std)));
%Abladezeiten

LKW_ENT=vertcat(LKW_ENT,LKW_ENT_neu);

end
end

LKW_E(r,:)=[] ;

end

%-----Ende Fahrt zu Entladestelle und Übergabe an Abladewarteschlange---
%-----Abladestelle und Übergabe zur Warteschlange Rückfahrt-----

S_LKW_ENT=size(LKW_ENT);

if(S_LKW_ENT(1,1)>0);

    if(S_LKW_ENT(1,1)>=2)%2=Abladestelle

        for i=1:1:2
            LKW_ENT(i,3)=LKW_ENT(i,3)-1;
        end

        if(S_LKW_ENT(1,1)>2)
            for i=3:1:S_LKW_ENT(1,1)

                TW_LKW(LKW_ENT(i,1),2)=TW_LKW(LKW_ENT(i,1),2)+1 ;

            end
        end

    elseif(S_LKW_ENT(1,1)<2)

        for i=1:1:S_LKW_ENT(1,1)
            LKW_ENT(i,3)=LKW_ENT(i,3)-1;
        end

    end

re0=any(LKW_ENT(:,3)==0,2);

if (sum(re0)>=1); %>=1 für mehr Abladestellen

    LKW_ER_neu= LKW_ENT; %LKW_ENT (i,:)

    re=any(LKW_ENT(:,3)>0,2);

    LKW_ER_neu(re,:)=[];

    S_LKW_ER_neu=size(LKW_ER_neu);
```

```
for i=1:1:S_LKW_ER_neu(1,1)

    S_LKW_ER=size(LKW_ER);
    if(S_LKW_ER(1,1)==0);

LKW_ER_neu(i,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(60,10,20,(20/t_std)));

LKW_ER=LKW_ER_neu(i,:);

elseif (S_LKW_ER(1,1)>0);

LKW_ER_neu(i,3)= int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(600,240,280,(120/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(120,10,40,(30/t_std)))+int32(Fahrzeiten_norm_begrenzt
(60,10,20,(20/t_std)));

LKW_ER=vertcat(LKW_ER,LKW_ER_neu(i,:));

    S_LKW_ER=size(LKW_ER);

    for j=1:1:S_LKW_ER(1,1);
        if(j>1)
            if(LKW_ER(j,3)<(LKW_ER(j-1,3)+4));
                LKW_ER(j,3)=LKW_ER(j-1,3)+4 ;
                %3 Sekunden minimaler Abstand
            end
        end
    end
end
end
end
LKW_ENT(re0,:)=[];

end

%-----Ende Abladestelle und Übergabe zur Warteschlange Rückfahrt-----

%-----Übergabe an Warteschlange Startpunkt-----

S_LKW_ER=size(LKW_ER);
if(S_LKW_ER(1,1)>0);

    for i=1:1:S_LKW_ER(1,1);

        LKW_ER(i,3)=LKW_ER (i,3)-1;

    end

rer=any(LKW_ER(1,3)==0,2);

if (sum(rer)==1)

    LKW_WS_neu=LKW_ER(1,:);
```

```
S_LKW_WS=size(LKW_WS);
if(S_LKW_WS(1,1)==0)

    LKW_WS_neu(1,3)= -100;
    LKW_WS=LKW_WS_neu;

elseif (S_LKW_WS(1,1)>0)

    LKW_WS_neu(1,3)= -100;
    LKW_WS=vertcat(LKW_WS,LKW_WS_neu);

end
end

LKW_ER(rer,:)=[] ;

end

%-----Ende Übergabe an Warteschlange Startpunkt-----

end

%%%%%%%%%%Ende der einzelnen Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%Auswertung der einzelnen Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%%

if(Kanban==0)

rcL1=any(Zwischenankunftszeiten(:,1)>LKW_Anzahl_Linie1,2);
ZZL1=Zwischenankunftszeiten;
ZZL1(rcL1,:)=[];

rcL2=any(Zwischenankunftszeiten(:,1)<=LKW_Anzahl_Linie1,2);
ZZL2=Zwischenankunftszeiten;
ZZL2(rcL2,:)=[];

SZL1=size(ZZL1);

for i=1:1:SZL1(1,1)
    if(i==1)
        Zwischenankunftszeiten_G1(i,1)=ZZL1(i,1);
        Zwischenankunftszeiten_G1(i,2)=ZZL1(i,2);
        Zwischenankunftszeiten_G1(i,3)=ZZL1(i,2);

    elseif(i>1)

        Zwischenankunftszeiten_G1(i,1)=ZZL1(i,1);
        Zwischenankunftszeiten_G1(i,2)=ZZL1(i,2)-ZZL1((i-1),2);
        Zwischenankunftszeiten_G1(i,3)=ZZL1(i,2);
    end
end

end

SZL2=size(ZZL2);

for i=1:1:SZL2(1,1)
    if(i==1)
```

```
Zwischenankunftszeiten_G2(i,1)=ZZL2(i,1);
Zwischenankunftszeiten_G2(i,2)=ZZL2(i,2);
Zwischenankunftszeiten_G2(i,3)=ZZL2(i,2);

elseif(i>1)

    Zwischenankunftszeiten_G2(i,1)=ZZL2(i,1);
    Zwischenankunftszeiten_G2(i,2)= ZZL2(i,2)-ZZL2((i-1),2);
    Zwischenankunftszeiten_G2(i,3)=ZZL2(i,2);

end

end

end

S_ZZ_B1=size(ZZ_B1);

for i=1:1:S_ZZ_B1(1,1)

    if (i==1)

        ZZ_B1_ges_neu(i,1)=ZZ_B1(i,1);

    else

        ZZ_B1_ges_neu(i,1)=ZZ_B1(i,1)-ZZ_B1((i-1),1);

    end

end

ZZ_B1_ges=vertcat(ZZ_B1_ges, ZZ_B1_ges_neu);

S_ZZ_B2=size(ZZ_B2);

for i=1:1:S_ZZ_B2(1,1)

    if (i==1)

        ZZ_B2_ges_neu(i,1)=ZZ_B2(i,1);

    else

        ZZ_B2_ges_neu(i,1)=ZZ_B2(i,1)-ZZ_B2((i-1),1);

    end

end

ZZ_B2_ges=vertcat(ZZ_B2_ges, ZZ_B2_ges_neu);%Zwischeankunftszeiten an

if(Kanban==0)

    Zwischenankunftszeiten_Liniel=vertcat(Zwischenankunftszeiten_Liniel,Zwische
nankunftszeiten_G1);
    %Zeit zwischen zwei Ankünften der LKW 1 am Startpunkt (für Validierung)
```

```

Zwischenankunftszeiten_Linie2=vertcat(Zwischenankunftszeiten_Linie2,Zwischenankunftszeiten_G2);

S_Zwischenankunftszeiten_G1=size(Zwischenankunftszeiten_G1(:,1))
S_Zwischenankunftszeiten_G2=size(Zwischenankunftszeiten_G2(:,1))

for i=1:1:S_Zwischenankunftszeiten_G1

A_STD_V1(i,1)=(gemessener_Mittelwert_Zwischenankunftszeiten1-
Zwischenankunftszeiten_G1(i,2))^2
%Array zur Validierung der Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten je
Simulationsdurchlauf bei bekanntem Erwartungswert
mean(reale_Zwischenankunftszeiten_Linie1)

end
Std_Validierung1(x)=sqrt(sum(A_STD_V1)/S_Zwischenankunftszeiten_G1(1,1))

for i=1:1:S_Zwischenankunftszeiten_G2

A_STD_V2(i,1)=(gemessener_Mittelwert_Zwischenankunftszeiten2-
Zwischenankunftszeiten_G2(i,2))^2

end

Std_Validierung2(x)=sqrt(sum(A_STD_V2)/S_Zwischenankunftszeiten_G2(1,1))

Mittelwert_simulierte_Zwischenankunftzeiten1(x,1)=mean(Zwischenankunftszeiten_G1((3*LKW_Anzahl_Linie1):end,2));
Standardabweichung_simulierte_Zwischenankunftzeiten1(x,1)=std(Zwischenankunftszeiten_G1((3*LKW_Anzahl_Linie1):end,2));

Mittelwert_simulierte_Zwischenankunftzeiten2(x,1)=mean(Zwischenankunftszeiten_G2((3*LKW_Anzahl_Linie2):end,2));
Standardabweichung_simulierte_Zwischenankunftzeiten2(x,1)=std(Zwischenankunftszeiten_G2((3*LKW_Anzahl_Linie2):end,2));

end

S_ZZ_WB1=size(ZZ_WB1)
S_ZZ_WB2=size(ZZ_WB2)

for i=1:1:S_ZZ_WB1(1,1)

if (i==1)
    ZZ_WB1_neu_ges(i,2)= ZZ_WB1(i,2);
    ZZ_WB1_neu_ges(i,1)= ZZ_WB1(i,1);
else
    ZZ_WB1_neu_ges(i,2)=ZZ_WB1(i,2)-ZZ_WB1((i-1),2);
    ZZ_WB1_neu_ges(i,1)= ZZ_WB1(i,1);
end
end

for i=1:1:S_ZZ_WB2(1,1)

if (i==1)
    ZZ_WB2_neu_ges(i,2)= ZZ_WB2(i,2);
    ZZ_WB2_neu_ges(i,1)= ZZ_WB2(i,1);
else
    ZZ_WB2_neu_ges(i,2)=ZZ_WB2(i,2)-ZZ_WB2((i-1),2);

```

```

        ZZ_WB2_neu_ges(i,1)= ZZ_WB2(i,1);
end
end

ZZ_WB1_ges=vertcat(ZZ_WB1_ges, ZZ_WB1_neu_ges);
ZZ_WB2_ges=vertcat(ZZ_WB2_ges, ZZ_WB2_neu_ges);

if(x==1);
S=TW_LKW(:,1);

end

TWLKW(:,x)=TW_LKW(:,2);

SUM_LKW=sum(TW_LKW(:,2));

ASUM_LKW(x)=SUM_LKW;
TWB1(x)=TW_B1;
TWB2(x)=TW_B2;
T(x)=t;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end %Ende Simulationsdurchlauf/ Schleife für Simulationsanzahl

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Auswertung der Simulationsdurchläufe%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

STD_B1=std(TWB1)
STD_B2=std(TWB2)

Mean_B1=mean(TWB1)
Mean_B2=mean(TWB2)

M_Std_ges (i_std,:)= [Mean_B1,STD_B1,Mean_B2,STD_B2]

%plot: x=[1,1.5,2,2.5,3,3.5,4] plot(x,M_Std_ges(:, "Spalte von M_Std_ges "))

end

M_TW_LKW=horzcat(S,TWLKW);

Bagger1_mittlere_Wartezeit=sum(TWB1)/x
Bagger2_mittlere_Wartezeit=sum(TWB2)/x

Mittlere_LKW_Wartezeit=sum(ASUM_LKW)/((LKW_Anzahl_Linie1+LKW_Anzahl_Linie2)
*x)

STD_B1=std(TWB1)
STD_B2=std(TWB1)

STD_LKW=std(ASUM_LKW)

STD_ZZ_B1=std(ZZ_B1_ges) %Standardabweichung der Zwischenabfahrtszeiten
STD_ZZ_B2=std(ZZ_B2_ges)

if (Kanban==0)
Mittelwert_ZZ1=mean(Zwischenankunftszeiten_Linie1(:,2))
Mittelwert_ZZ2=mean(Zwischenankunftszeiten_Linie2(:,2))

```

xxxix


```
hist(ZZ_B2_ges,40)
title('Zwischenabfahrtszeiten LKW B2')

subplot(2,1,1)
hist(ZZ_B1_ges,40)
title('Zwischenabfahrtszeiten LKW B1')

rc=any(ZZ_B1_ges<400,2);
Sep_ZZ_B1_ges=ZZ_B1_ges;
Sep_ZZ_B1_ges(rc,:)=[];

hist(Sep_ZZ_B1_ges,30)
title('Zwischenabfahrtszeiten LKW B1 größer 400 [s]')

rc=any(ZZ_B2_ges<400,2);
Sep_ZZ_B2_ges=ZZ_B2_ges;
Sep_ZZ_B2_ges(rc,:)=[];

hist(Sep_ZZ_B2_ges,30)
title('Zwischenabfahrtszeiten LKW B2 größer 400 [s]')

subplot(2,1,2)
hist(ZZ_WB2_ges(:,2),30)
title('Zwischenankunftszeiten LKW B2')

subplot(2,1,1)
hist(ZZ_WB1_ges(:,2),30)
title('Zwischenankunftszeiten LKW B1')

rc=any(ZZ_WB1_ges(:,2)<600,2);
Sep_ZZ_WB1_ges=ZZ_WB1_ges;
Sep_ZZ_WB1_ges(rc,:)=[];

hist(Sep_ZZ_WB1_ges(:,2),30)
title('Zwischenankunftszeiten LKW B1 größer 600 [s]')

rc=any(ZZ_WB2_ges(:,2)<600,2);
Sep_ZZ_WB2_ges=ZZ_WB2_ges;
Sep_ZZ_WB2_ges(rc,:)=[];

hist(Sep_ZZ_WB2_ges(:,2),30)
title('Zwischenankunftszeiten LKW B2 größer 600 [s]')

%weitere Ausgaben können durch die standardisierten Befehle:
%"mean(x)" (Mittelwert) und
%"std(x)" Standardabweichung aufgerufen werden
```

Weitere aufgerufene Funktionen:**1. Beladezeiten**

```
function [tb] = Beladezeit_norm_begrenzt (o,u,Mittelwert
,Standardabweichung)
    % Spielzeiten (normalverteilt) für Baumaschinen
    Untergrenze = u;
    Obergrenze = o;
    % =====

    tb = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    while (tb<Untergrenze) | (tb>Obergrenze);
        tb = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    end

end
```

2. Fahrzeiten

```
function [tfh] = Fahrzeiten_norm_begrenzt (o,u,Mittelwert
,Standardabweichung)
    % Fahrzeiten (normalverteilt) für Baumaschinen
    Untergrenze = u;
    Obergrenze = o;
    % =====

    tfh = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    while (tfh <Untergrenze | tfh >Obergrenze);
        tfh = random ('normal',Mittelwert,Standardabweichung);
    end
    tfh = round (tfh);%Spielzeit

end
```

Anhang 10 – Detaillierte Erläuterung der Simulationsergebnisse von Kapitel 6.1.1

Simulationsergebnisse Variante 1

Die Wartezeiten des Baggers von Linie 1 haben sich bei den Simulationsdurchläufen wie in Abbildung 8-4 dargestellt entwickelt. Die mittlere Wartezeit betrug 9519 Sekunden, was ca. 33% der gesamten simulierten Arbeitszeit entspricht. Wie erwartet³⁹⁶ haben sich annähernd normalverteilte Wartezeiten ergeben. Die Standardabweichung betrug 239 [s].

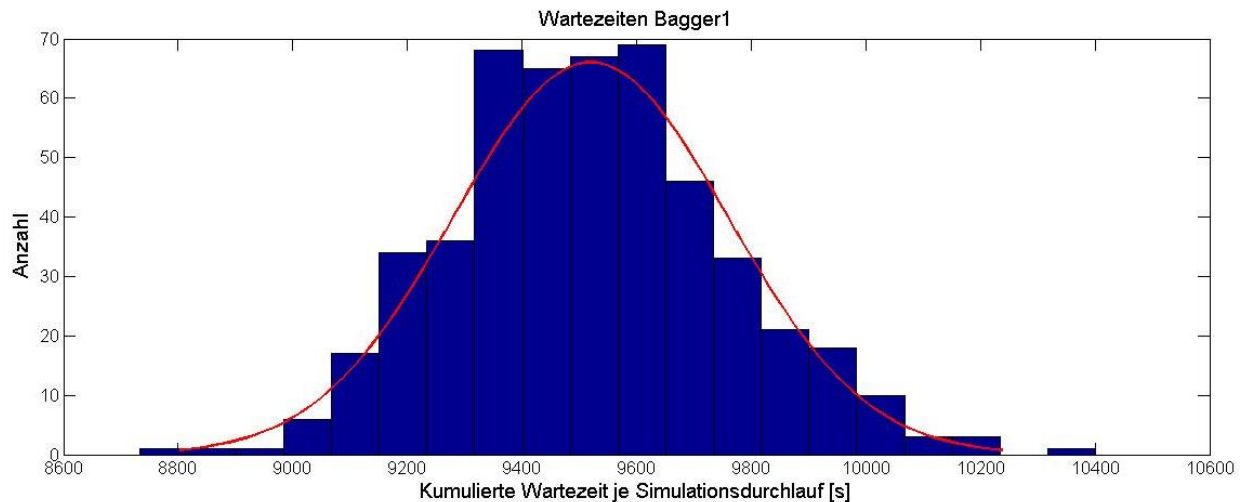


Abbildung 8-4: Wartezeitenentwicklung Bagger 1 für Variante 1

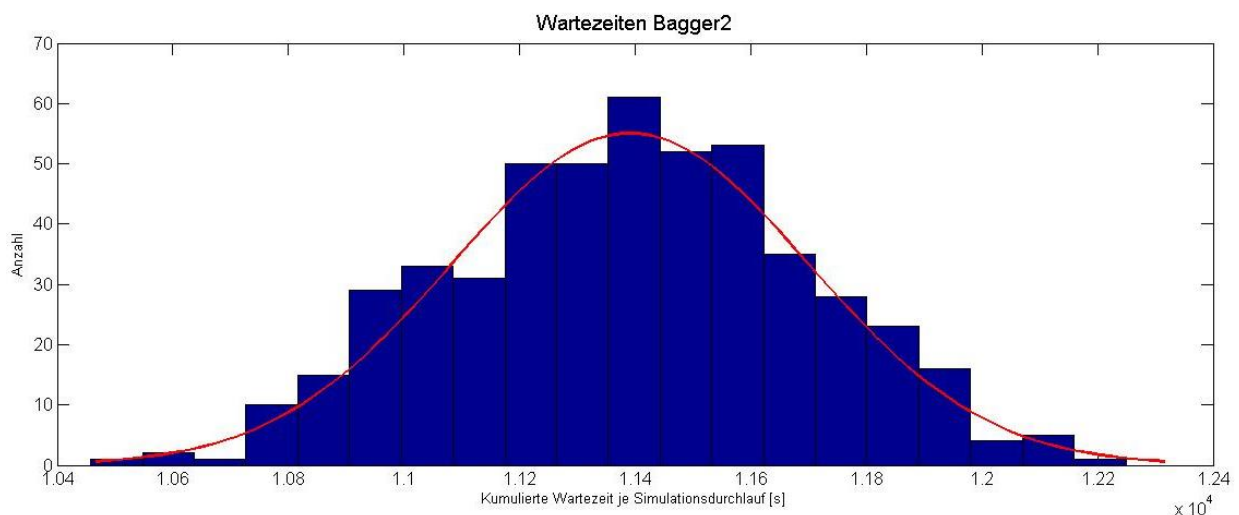


Abbildung 8-5: Wartezeitenentwicklung Bagger 2 für Variante 1

Für die Wartezeiten von Bagger 2 ergeben sich ebenfalls annähernd normalverteilte Zeiten (vgl. Abbildung 8-5). Der Mittelwert der Wartezeiten beträgt 11391 [s]. Hieraus folgt bei einer simulierten Arbeitszeit von 29000 [s], dass die mittlere Auslastung 61 % betrug. Die Standardabweichung der Wartezeiten betrug 308 [s]. Erwartungsgemäß ist die Standardabweichung der längeren Transportstrecke größer.

³⁹⁶ Da normalverteilte Spielzeiten angenommen wurden.

Die kumulierte Wartezeit der LKW ergab im Mittel 43183 [s], d.h. bei 21 eingesetzten LKW eine durchschnittliche Wartezeit von 2057 [s], was einer Auslastung von 93 % entspricht. Die Verteilung der LKW-Wartezeiten ist in Abbildung 8-6 dargestellt.

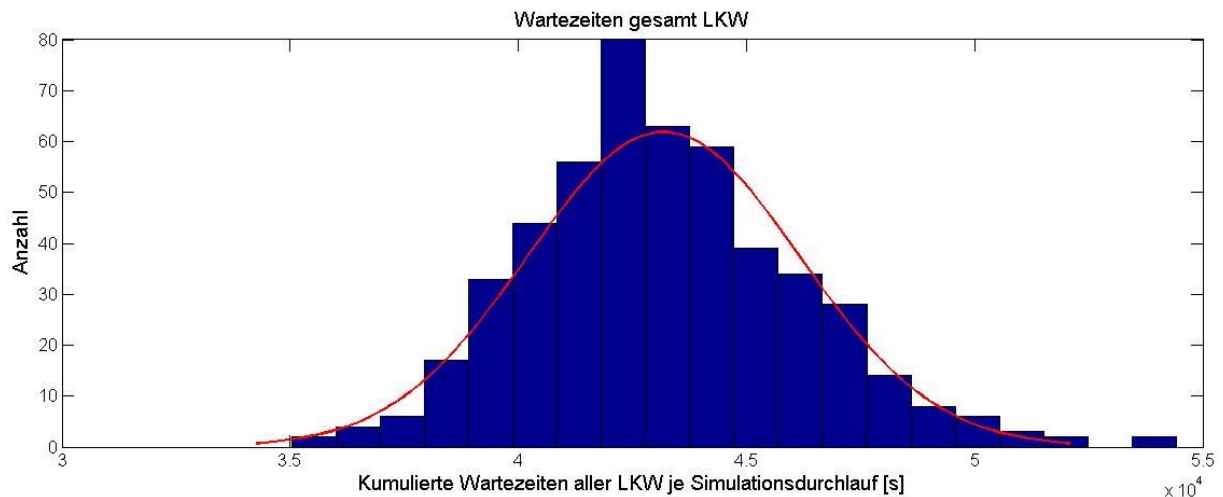


Abbildung 8-6: Wartezeitenentwicklung der LKW für Variante 1

Die Auswertung der LKW-Wartezeiten pro Linie ist in Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8 abgebildet. Beide Linien haben eine nahezu identische Verteilung der Wartezeiten. Auch die durchschnittliche Wartezeit der LKW je Linie war sehr ähnlich. Die durchschnittliche Wartezeit der LKW von Linie 1 betrug 2215 [s] und die von Linie 2 2043[s]. Die Standardabweichung von Linie 1 betrug 497 [s], diejenige von Linie 2 560 [s]. Erwartungsgemäß ist die Standardabweichung von Linie 2 aufgrund der längeren Transportstrecke leicht erhöht.

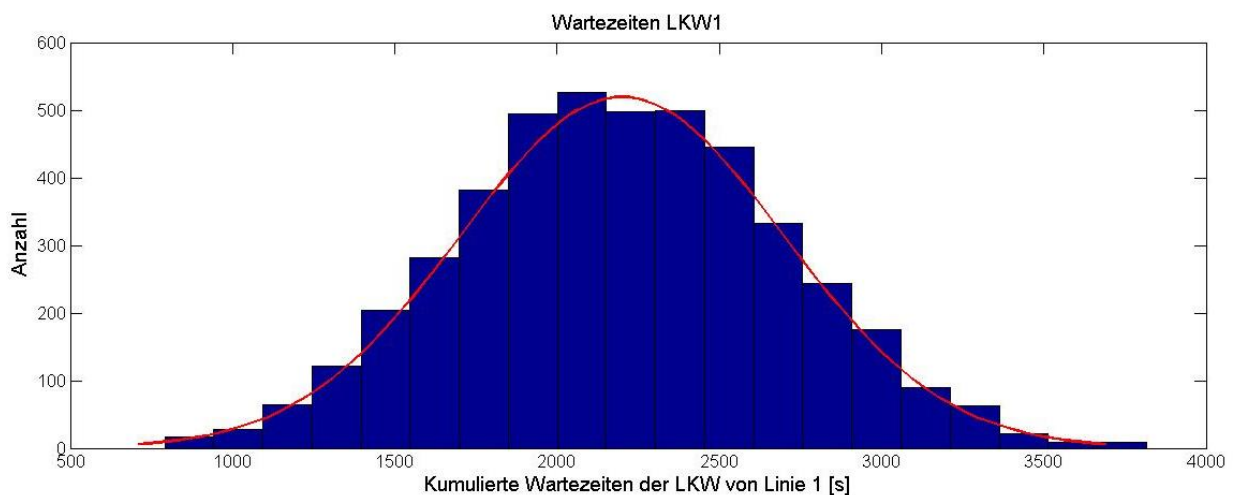


Abbildung 8-7: Wartezeitenentwicklung der LKW von Linie 1 pro Simulationsdurchlauf für Variante 1

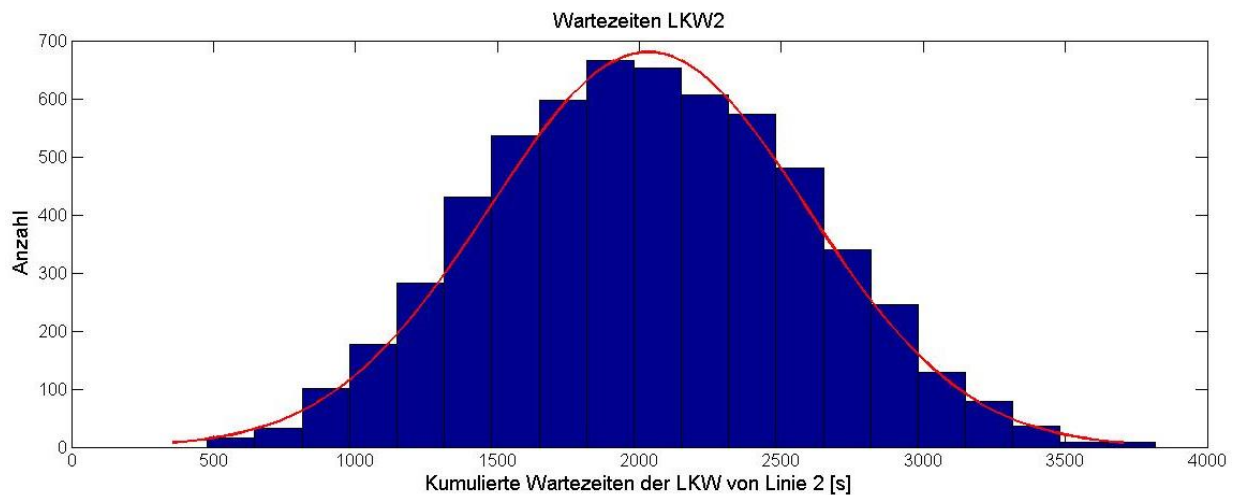


Abbildung 8-8: Wartezeitenentwicklung der LKW von Linie 2 pro Simulationsdurchlauf für Variante 1

Um die Wartezeitenentwicklung differenzierter betrachten zu können, wurden die Zwischenankunftszeiten der LKW an den Baggern erfasst. Unter Zwischenankunftszeiten sind die Zeitdifferenzen zwischen zwei LKW-Ankünften an einem Bagger zu verstehen. Die Analyse der Zwischenankunftszeiten an Bagger 1 hat die in Abbildung 8-9 dargestellte Verteilung ergeben. Im Mittel betrug die Zwischenankunftszeit 138 [s]. Die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten betrug 147 [s].

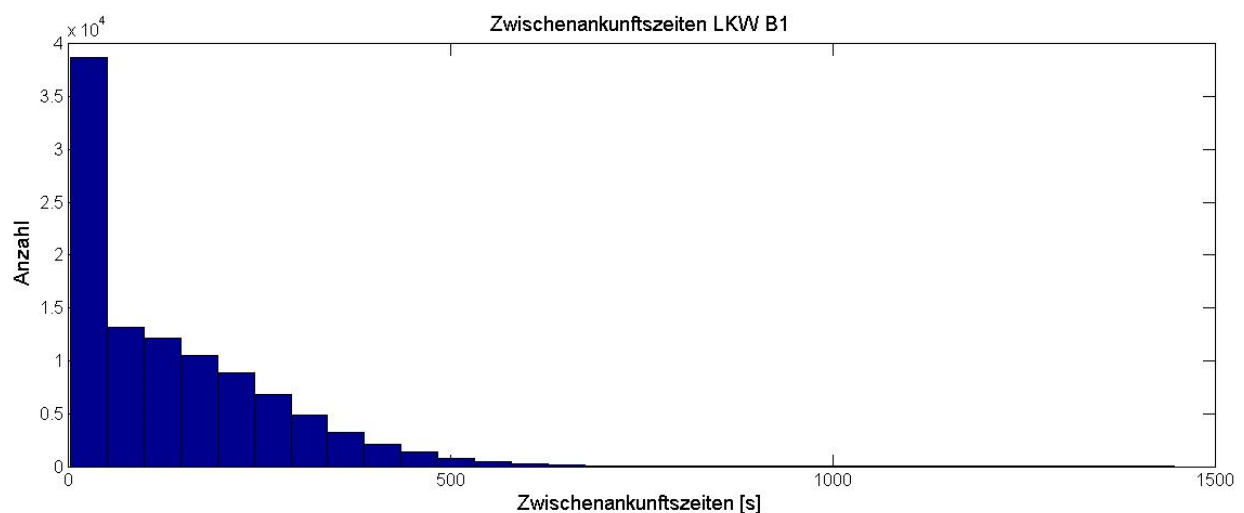


Abbildung 8-9: Zwischenankunftszeiten der LKW an Bagger 1 für Variante 1

Aufgrund der hohen Repräsentanz kleinerer Zwischenankunftszeiten sind die hohen Zwischenankunftszeiten durch die Skalierung der y-Achse kaum zu erkennen. Eine isolierte Darstellung der Zwischenankunftszeiten größer oder gleich 600 [s] (vgl. Abbildung 8-10) veranschaulicht die Simulationsergebnisse. Diese isolierte Betrachtung ist erforderlich, da gerade hohe Zwischenankunftszeiten zu erheblichen Systemstörungen führen. Im Extremfall einer Zwischenankunftszeit von ca. 1400 [s] bedeutet dies, dass 23,3 Minuten vergehen, bis ein neuer LKW am Bagger 1 eingetroffen ist. Dies verursacht auf realen Baustellen erhebliche Systemschwankungen.

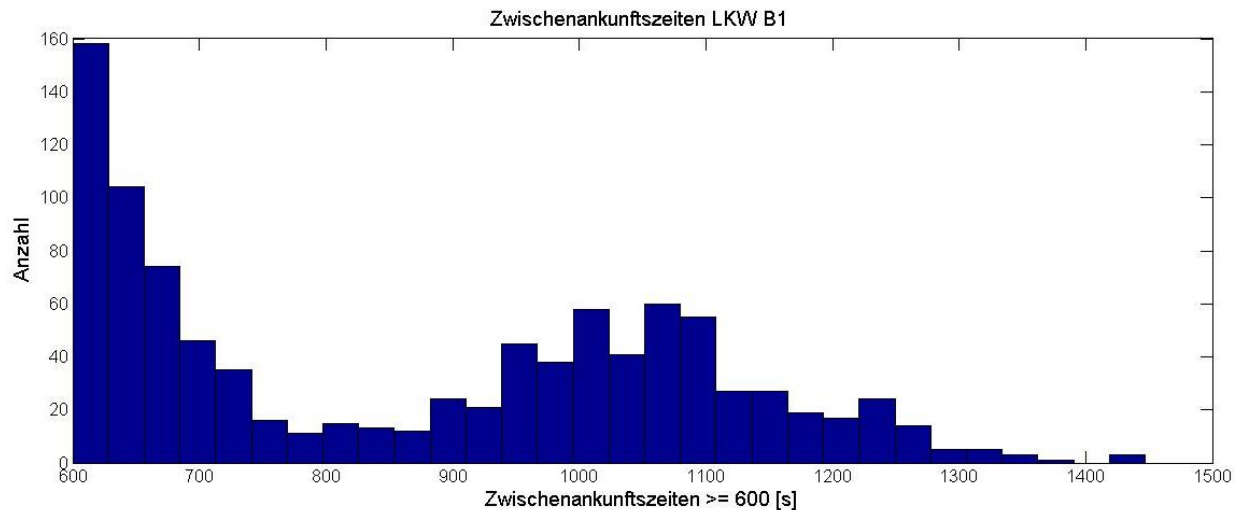


Abbildung 8-10: Isolierte Darstellung der Zwischenankunftszeiten ≥ 600 [s] für Linie 1 für Variante 1

Die Simulationsergebnisse der Zwischenankunftszeiten der LKW von Linie 2 sind in Abbildung 8-11 dargestellt. Die mittlere Zwischenankunftszeit betrug 128 [s] und die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten 161 [s]. Erwartungsgemäß ist die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten an Bagger 2 aufgrund der längeren Fahrstrecken größer als an Bagger 1. Der geringere Wert für die mittlere Zwischenankunftszeit lässt sich auf die höhere LKW-Anzahl in Linie 2 zurückführen.

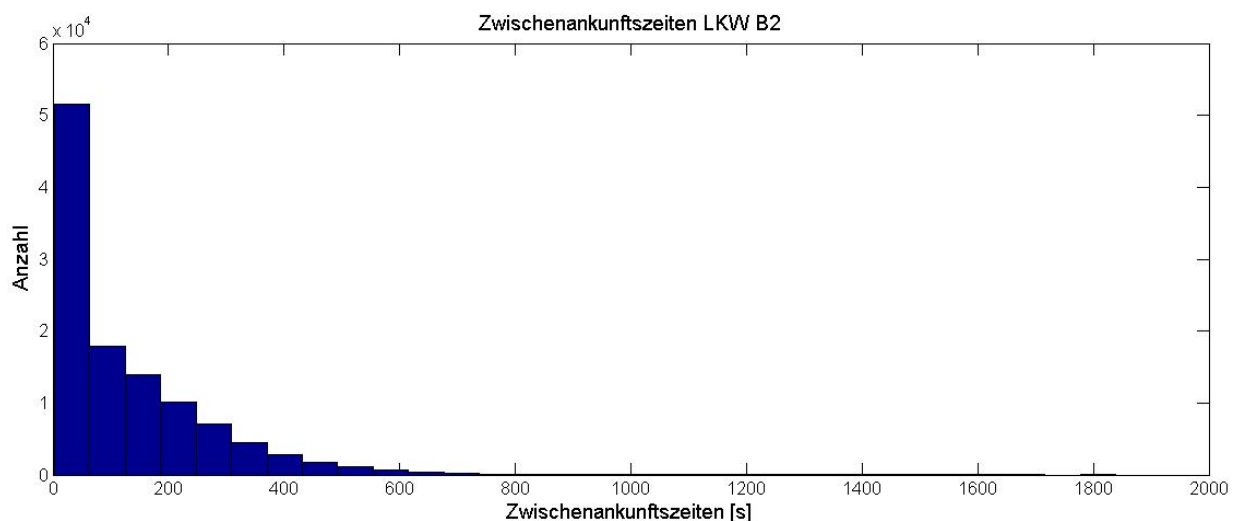


Abbildung 8-11: Zwischenankunftszeiten der LKW an Bagger 2 für Variante 1

Die isolierte Betrachtung der Zwischenankunftszeiten größer oder gleich 600 [s] ist in Abbildung 8-12 dargestellt. Interessant ist, dass die Anzahl der Zwischenankunftszeiten in Abbildung 8-10 und Abbildung 8-12 mit größer werdender Zwischenankunftszeit fällt und ab einer gewissen größer erneut zunimmt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass eine systematische "Verschlechterung" des Systems durch starke Schwankungen in den einzelnen Prozesszeiten³⁹⁷ eintritt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein LKW eine besonders hohe Fahrzeit auf einem Streckenabschnitt aufweist, der von beiden Linien benutzt wird und somit LKW der anderen Linie behindert³⁹⁸.

³⁹⁷ Prozesszeiten beinhalten hierbei sowohl produktive als auch nicht produktive Zeitanteile.

³⁹⁸ zur Erinnerung, ein Teil der Transportstrecke wird von beiden Linien benutzt (vgl. Abbildung 6-1)

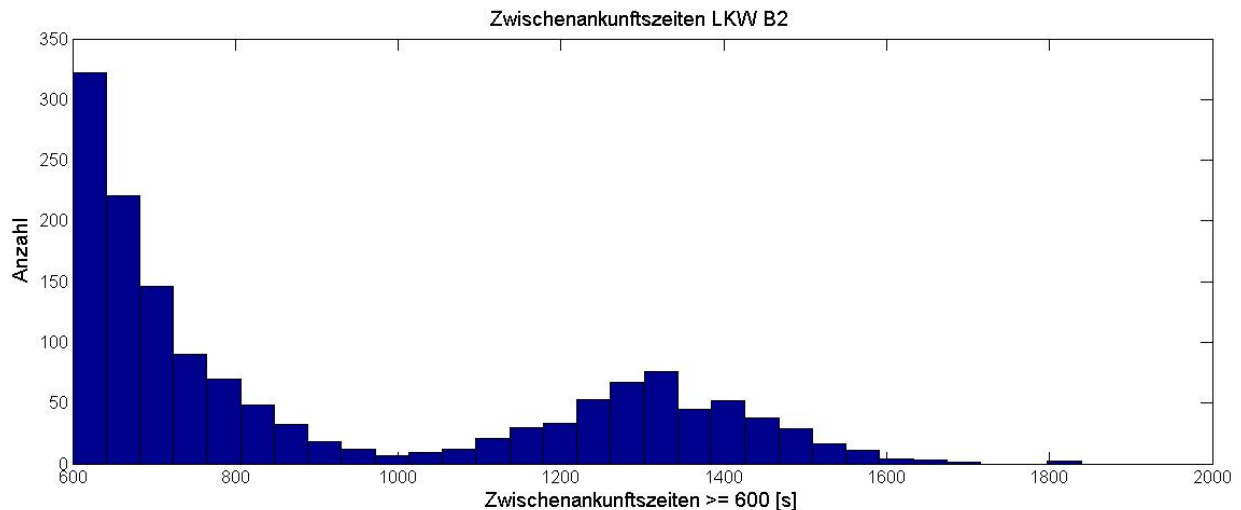


Abbildung 8-12: Isolierte Darstellung der Zwischenankunftszeiten ≥ 600 [s] für Linie 2 für Variante 1

Eine Analyse der Zeiten zwischen zwei Abfahrten der LKW an einem Bagger (im folgenden Zwischenabfahrtszeiten) ergab die abgebildeten Histogramme in Abbildung 8-13 und Abbildung 8-14. Der Mittelwert der Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 1 betrug 139 [s] und an Bagger 2 129 [s]. Der Mittelwert der Zwischenabfahrtszeiten ist erwartungsgemäß an Bagger 1 größer, da die Wartezeiten der LKW für beide Linien sehr ähnlich sind und die Beladezeit von Bagger 1 größer ist als diejenige von Bagger 2. Die Standardabweichung der Zwischenabfahrtszeiten betrug für Linie 1 84 [s]. Für Linie 2 betrug die Standardabweichung 100 [s]. Die größere Standardabweichung der Zwischenabfahrtszeiten von Linie 2 resultiert aus den stärker schwankenden Fahrzeiten der LKW aufgrund der längeren Transportstrecke. Deutlich ist des Weiteren zu erkennen, dass durch die vor dem jeweiligen Bagger wartenden LKW ein Abbau der Standardabweichungen stattfindet, dies folgt aus dem Vergleich der Standardabweichungen von Zwischenankunfts- und Zwischenabfahrtszeiten.

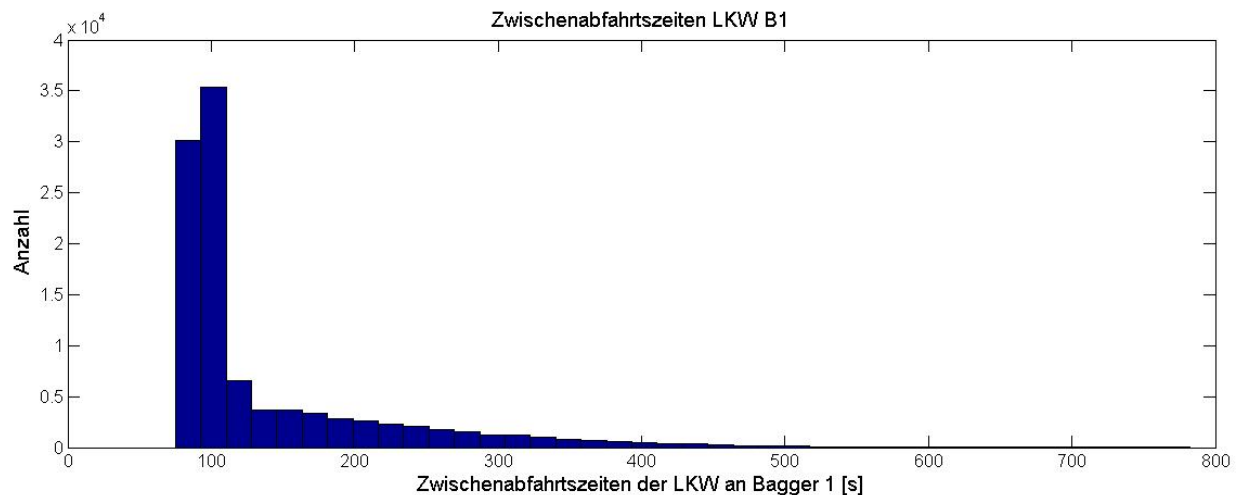


Abbildung 8-13: Histogramm der Zwischenabfahrtszeiten der LKW an Bagger 1 für Variante 1

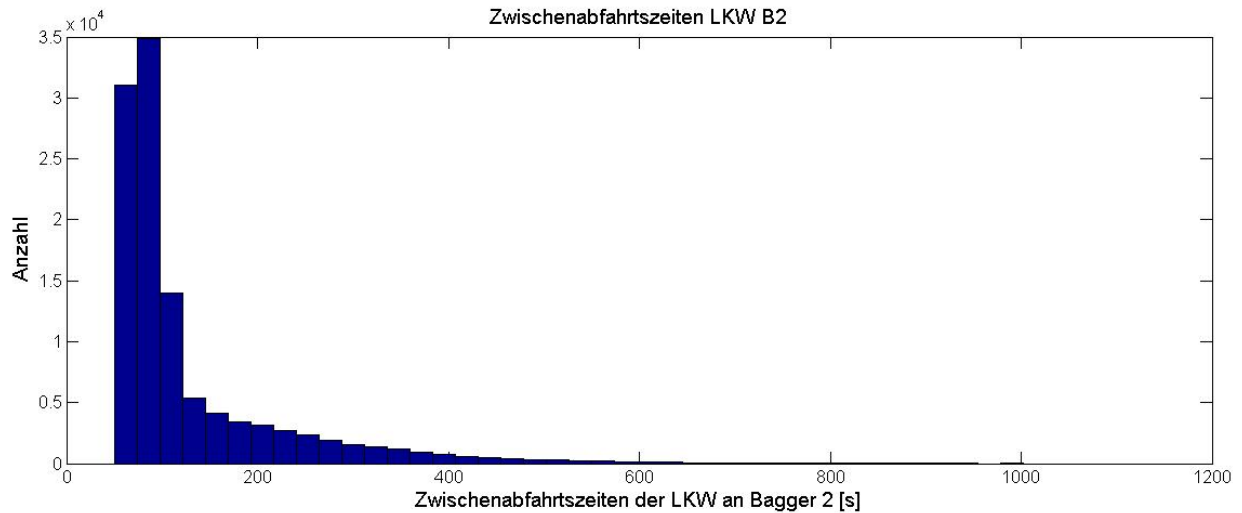


Abbildung 8-14: Histogramm der Zwischenabfahrtszeiten der LKW an Bagger 2 für Variante 1

Eine genauere Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten für den Bereich größer oder gleich 400 [s] ist in Abbildung 8-15 und Abbildung 8-16 dargestellt. Diese Darstellungen verdeutlichen, dass die größeren Zwischenankunftszeiten durch existierende Puffer in Form von wartenden LKW zum Teil aufgefangen werden. Deutlich zu erkennen ist dies beispielsweise an den maximalen Zwischenabfahrtszeiten von ca. 780 [s] für Linie 1 und ca. 1000 [s] für Linie 2. Diesen maximalen Zwischenabfahrtszeiten stehen maximal Zwischenankunftszeiten von ca. 1440 [s] für Linie 1 und ca. 1820 [s] für Linie 2 gegenüber, welche deutlich größer sind.

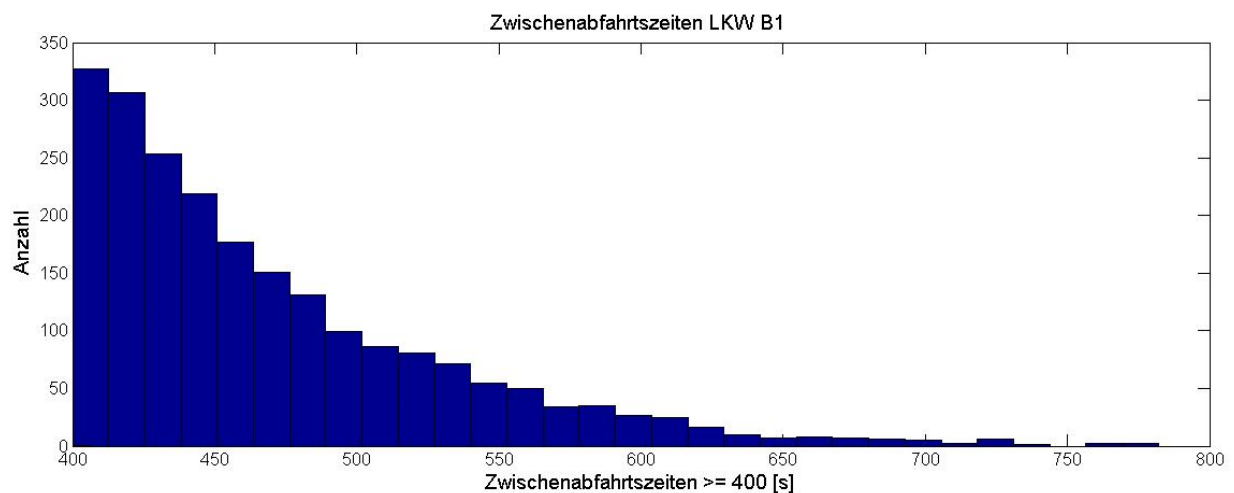


Abbildung 8-15: Isolierte Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten ≥ 400 [s] für Linie 1 für Variante 1

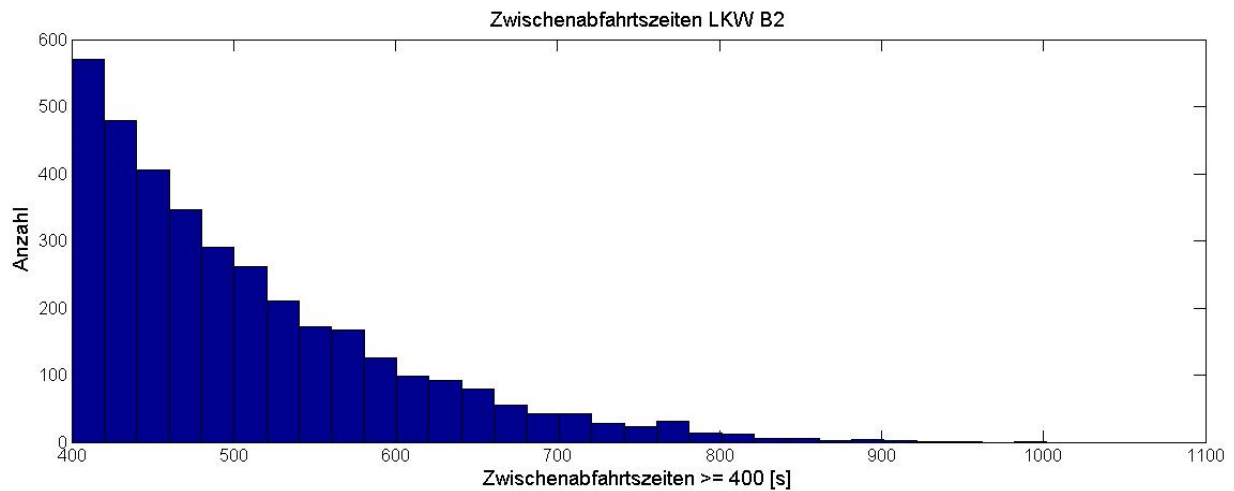


Abbildung 8-16: Isolierte Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten ≥ 400 [s] für Linie 2 für Variante 1

Simulationsergebnisse Variante 2

Für Variante 2 haben sich die in Abbildung 8-17 dargestellten Wartezeiten für Bagger 1 in der Simulation ergeben. Die mittlere Wartezeit betrug im Mittel 8329 [s], was ca. 29 % der gesamten simulierten Arbeitszeit entspricht. Die gesamte Wartezeit von Bagger 1 hat sich somit durchschnittlich um 12,5 % reduziert. Dies ist einer erheblichen Systemverbesserung gleichzusetzen. Die Standardabweichung der Wartezeiten betrug 251 [s] und ist damit leicht gestiegen.

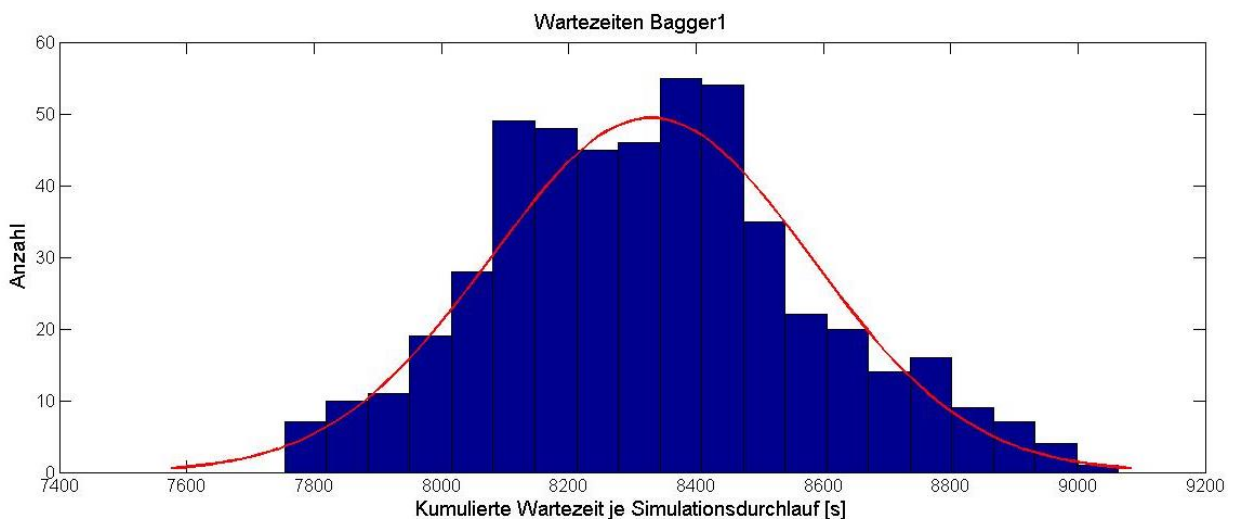


Abbildung 8-17: Wartezeitenentwicklung Bagger 1 für Variante 2

Für die Wartezeiten von Bagger 2 hat sich die in Abbildung 8-18 dargestellte Verteilung der Wartezeiten ergeben. Der Mittelwert der Wartezeit betrug 11916 [s]. Hieraus folgt, dass die mittlere Auslastung 59% war. Die Wartezeit ist somit um 4,6 % gestiegen. Gleichzeitig ist die Standardabweichung der Wartezeiten von 308 [s] auf 294 [s] gesunken, was einer vernachlässigbaren Verbesserung entspricht. Auch für Variante 2 gilt - analog zu Variante 1 -, dass erwartungsgemäß die Standardabweichung der Wartezeiten des Baggers von Linie 2 aufgrund der längeren Transportstrecke größer ist.

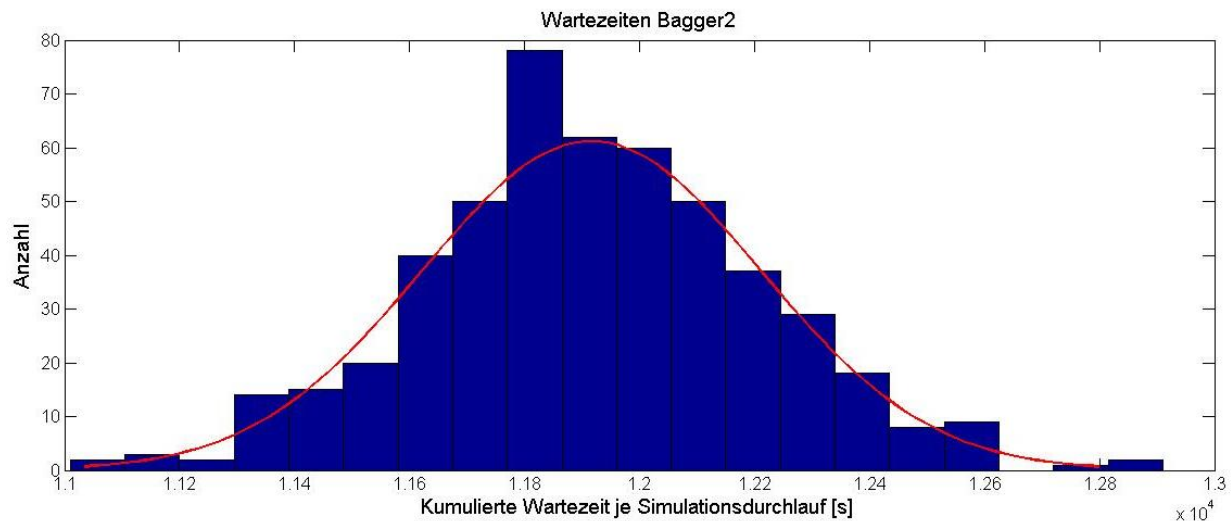


Abbildung 8-18: Wartezeitenentwicklung Bagger 2 für Variante 2

Addiert man die Wartezeiten der Bagger von Variante 1 so erhält man eine Wartezeit von 20910 [s]. Für Variante 2 ergibt sich eine Gesamtwartezeit der Bagger von 20245 [s]. Somit hat sich die Wartezeit im Durchschnitt um 3,2% verringert.

Die Entwicklung der kumulierten Wartezeiten aller LKW ist in Abbildung 8-19 dargestellt. Obwohl durch die an Kanban orientierte Steuerung zusätzliche Wartezeiten am Verteilungspunkt der LKW entstehen können, war die kumulierte Wartezeit aller LKW bei Variante 2 geringer (vgl. Abbildung 8-19 und Abbildung 8-6). Der Mittelwert der kumulierten Wartezeiten war 39849 [s], was einer Verringerung von 7,7 % entspricht. Die Standardabweichung der kumulierten Wartezeiten betrug für Variante 2 2643 [s], zum Vergleich betrug die Standardabweichung für Variante 1 2727 [s].

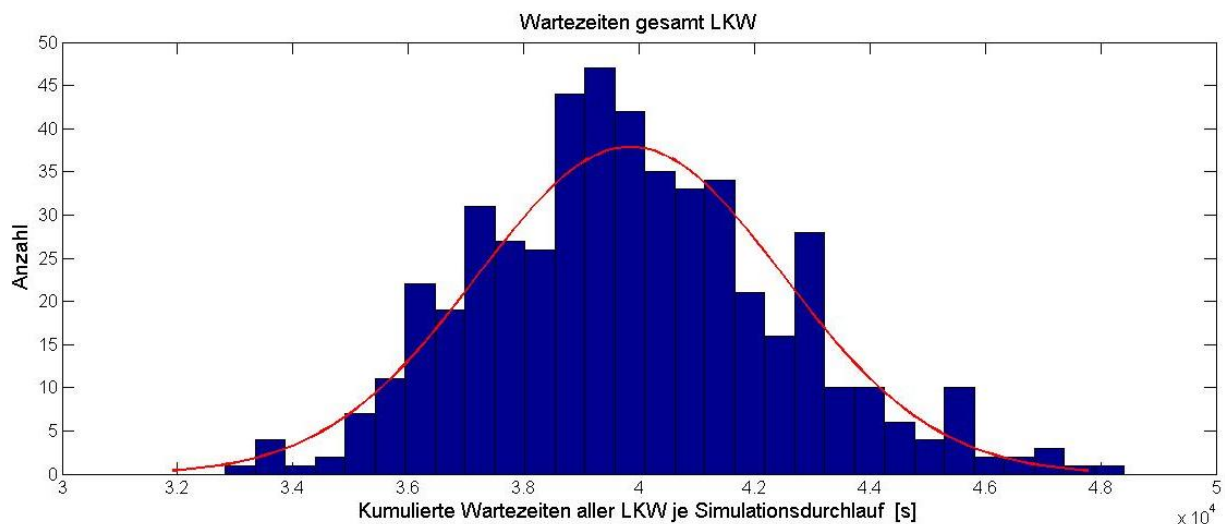


Abbildung 8-19: Wartezeitenentwicklung der LKW für Variante 2

Die Analyse der Zwischenankunftszeiten an Bagger 1 für Variante 2 hat die in Abbildung 8-20 dargestellte Verteilung hervorgebracht. Der Mittelwert der Zwischenankunftszeiten an Bagger 1 für Variante 2 betrug 131 [s]. Die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten betrug 108 [s]. Hieraus lässt sich folgern, dass der Mittelwert für Variante 1 (138 [s]) und 2 annähernd identisch ist, jedoch die Standardabweichung für Variante 2 deutlich geringer ausfällt (die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten betrug für Variante 1 147 [s]). Eine isolierte Betrachtung der hohen Zwischenankunftszeiten für Linie 1 verdeutlicht, dass hohe Werte deutlich seltener auftreten und

ebenfalls deutlich geringer ausfallen. Für Variante 1 wurden Zwischenankunftszeiten von bis zu ca. 1400 [s] festgestellt, für Variante 2 hingegen Maximalwerte bis zu ca. 830 [s] (vgl. Abbildung 8-21).

Eine nahezu identische Feststellung folgt aus der Auswertung der Zwischenankunftszeiten an Bagger 2 (vgl. Abbildung 8-22 und Abbildung 8-23). Die Reduktion der Streuung der Zwischenankunftszeiten fällt für Linie 2 deutlich höher aus, was an der im Vergleich zu Variante 1 (die Standardabweichung der Zwischenankunftszeit betrug 161 [s]) deutlich niedrigeren Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten zu erkennen ist (die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten betrug für Linie 2 für Variante 2 108 [s]). Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass der Mittelwert der Zwischenankunftszeiten für beide Varianten nahezu identisch geblieben ist (für Variante 1 128 [s] bzw. 131 [s] für Variante 2).

Die bisherigen Ergebnisse sprechen somit insbesondere für eine Verstetigung der Prozesse (d.h. eine Reduktion der Standardabweichungen) bei Anwendung von Variante 2 im Vergleich zur Anwendung von Variante 1.

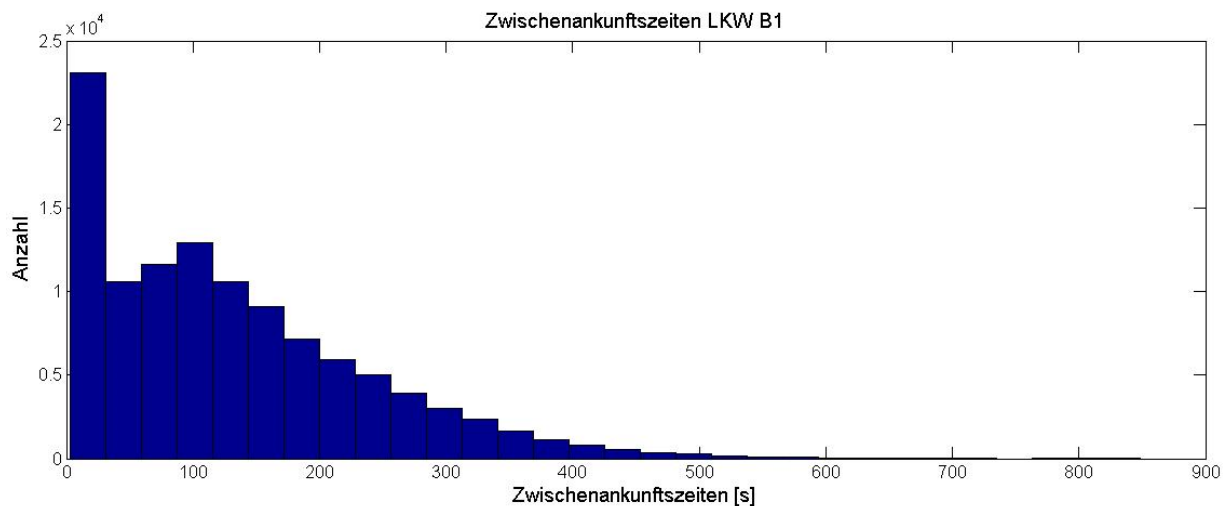


Abbildung 8-20: Zwischenankunftszeiten der LKW an Bagger 1 für Variante 2

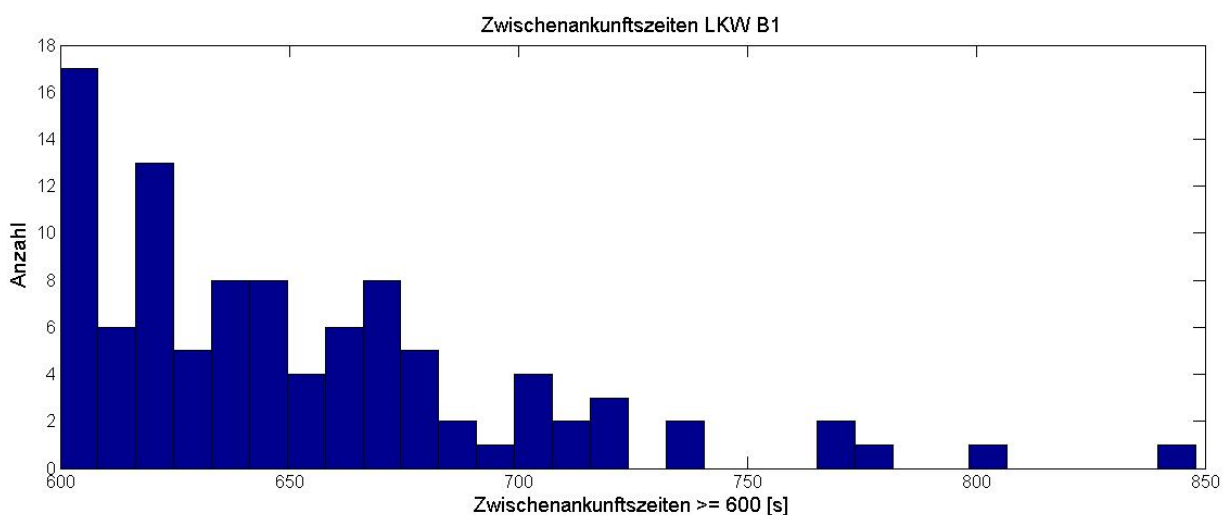


Abbildung 8-21: Isolierte Darstellung der Zwischenankunftszeiten ≥ 600 [s] für Linie 1 für Variante 2

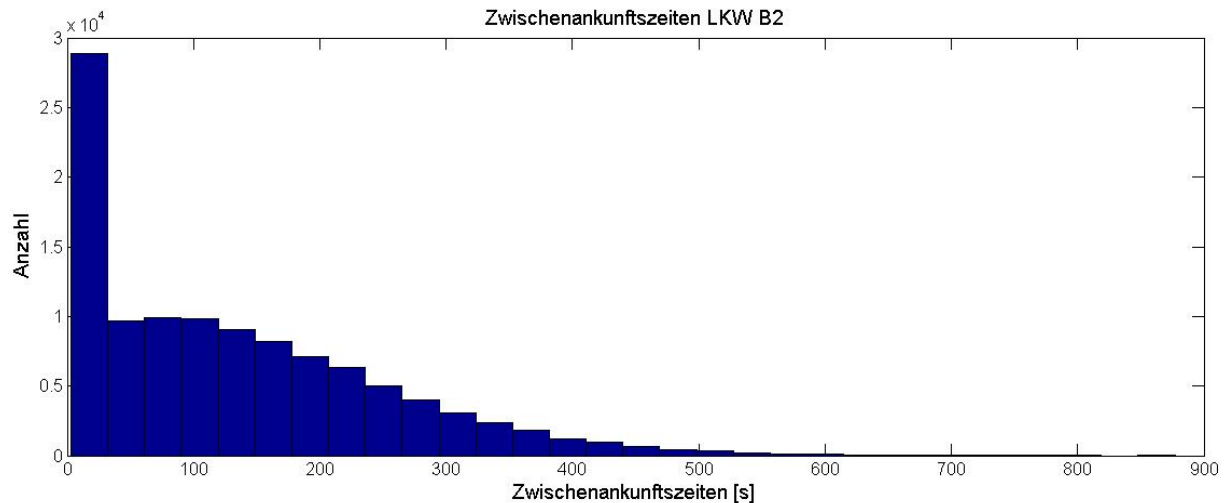


Abbildung 8-22: Zwischenankunftszeiten der LKW an Bagger 2 für Variante 2

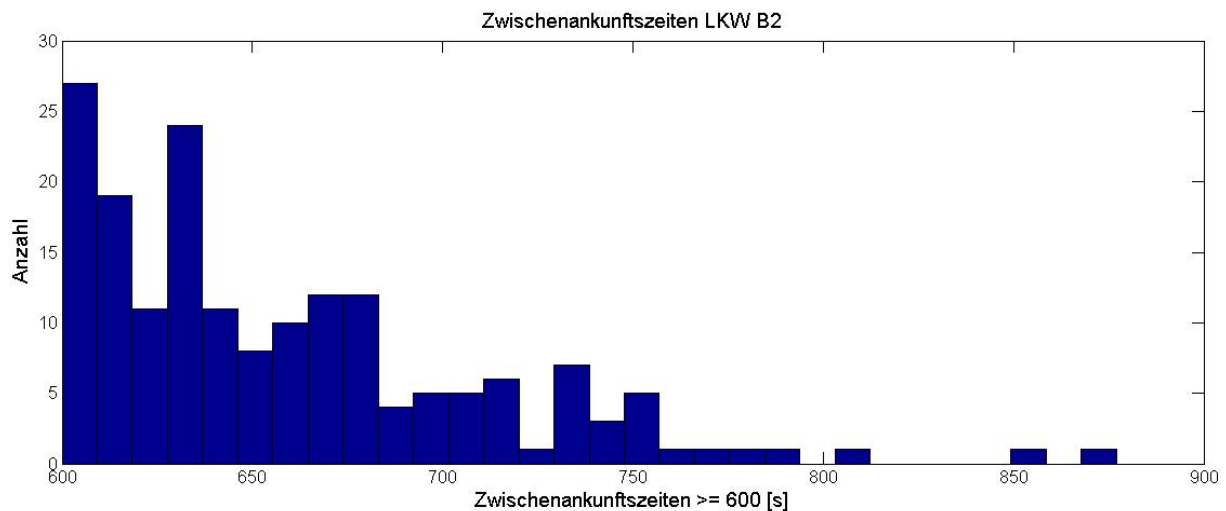


Abbildung 8-23: Isolierte Darstellung der Zwischenankunftszeiten ≥ 600 [s] für Linie 2 für Variante 2

Neben den Zwischenankunftszeiten sind insbesondere die Zwischenabfahrtszeiten der beladenen LKW bei der Bewertung der beiden Varianten von Bedeutung. Für Variante 2 ergeben sich die in Abbildung 8-24 dargestellten Verteilungen der Zwischenabfahrtszeiten. Die mittlere Zwischenabfahrtszeit der LKW an Bagger 1 betrug für Variante 2 131 [s] und die zugehörige Standardabweichung 71 [s]. Eine Gegenüberstellung zu Variante 1 verdeutlicht eine leichte Reduktion des Mittelwerts gegenüber Variante 1 (ca. 6 % Verringerung) und eine stärkere Reduktion der Standardabweichung (um ca. 15 %).

Der Mittelwert der Zwischenabfahrtszeiten an Bagger 2 für Variante 2 betrug 133 [s] und die Standardabweichung der Zwischenabfahrtszeiten 88 [s]. Hieraus folgt eine Steigerung des Mittelwerts um ca. 3,1 % und eine Verringerung der Standardabweichung um ca. 12 %.

Die isolierte Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten für größere Werte lässt deutlich erkennen, dass höhere Werte im Fall von Variante 2 seltener auftreten (vgl. Abbildung 8-15 und Abbildung 8-16 mit Abbildung 8-26 und Abbildung 8-27).

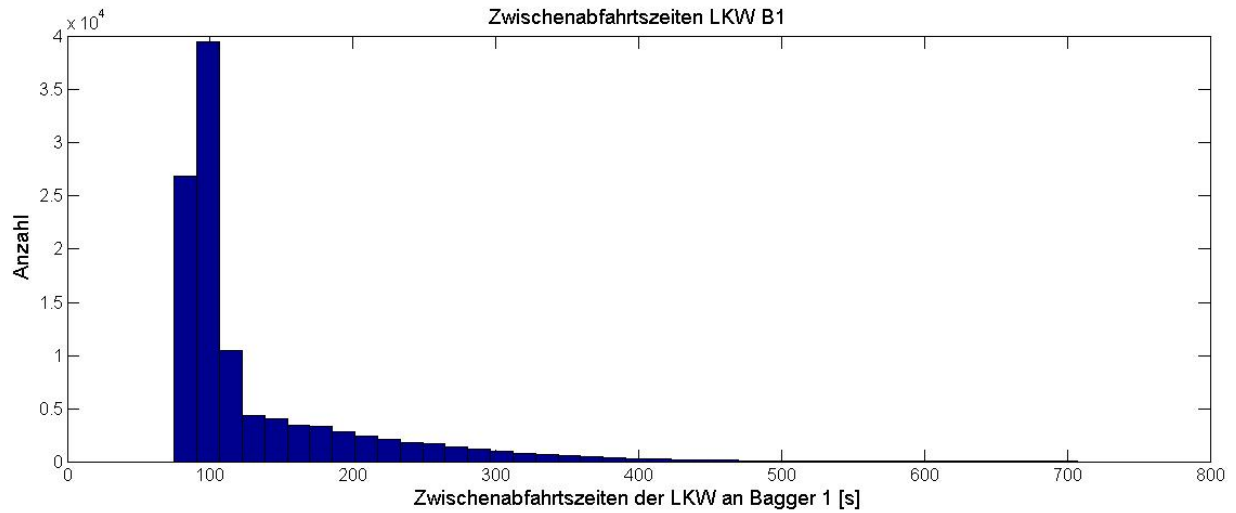


Abbildung 8-24: Histogramm der Zwischenabfahrtszeiten der LKW an Bagger 1 für Variante 2

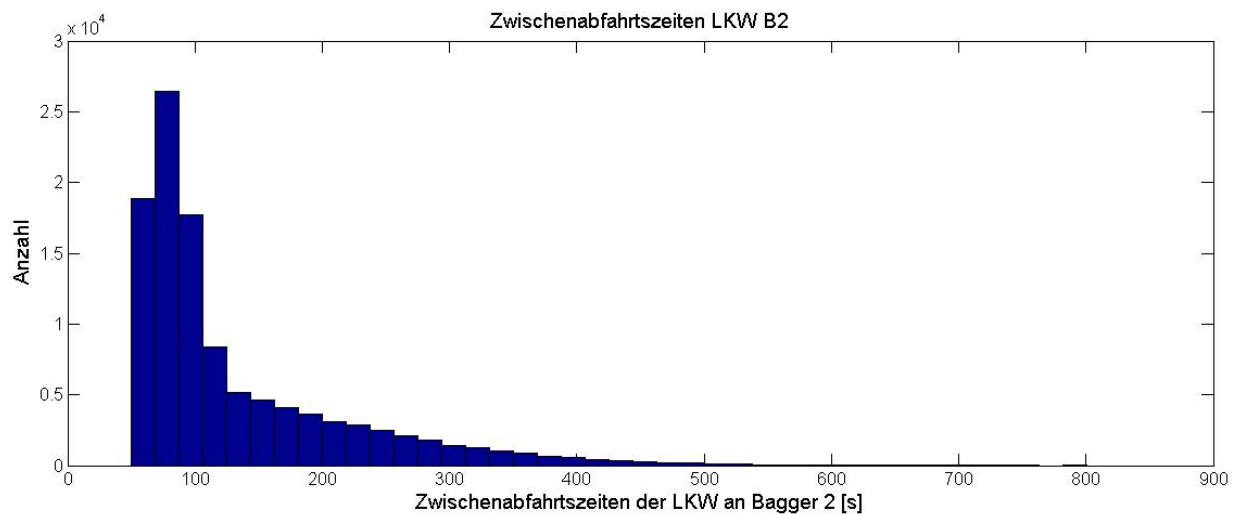


Abbildung 8-25: Histogramm der Zwischenabfahrtszeiten der LKW an Bagger 2 für Variante 2

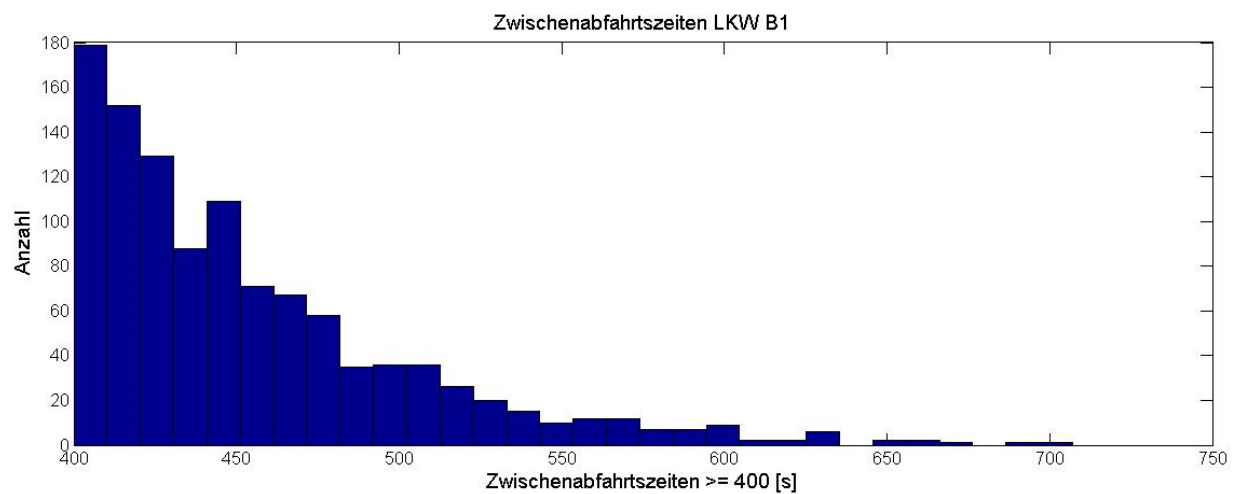


Abbildung 8-26 : Isolierte Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten ≥ 400 [s] für Linie 1 für Variante 2

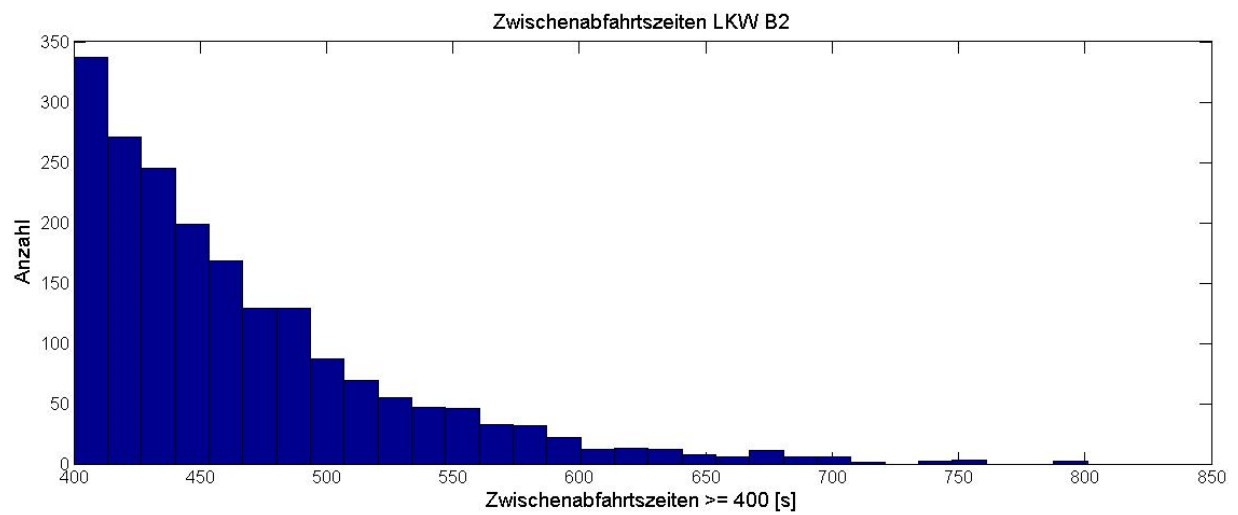


Abbildung 8-27: Isolierte Darstellung der Zwischenabfahrtszeiten ≥ 400 [s] für Linie 2 für Variante 2

Anhang 11 - Analyse der Auswirkung der Reduktion von Standardabweichungen von Prozesszeiten anhand der diskreten Ereignis-Simulation

Zur Veranschaulichung welche Auswirkung die Reduktion von Standardabweichungen von Produktionsprozesszeiten hat, wurde in diesem Kapitel die in Anhang 9 vorgestellte Simulation mit unterschiedlichen Standardabweichungen gestartet und die jeweiligen Ergebnisse analysiert.

Zur Beurteilung der Auswirkungen ist der Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Baggerwartzeiten und der Entwicklung der Standardabweichungen der Baggerwartzeiten in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Prozesszeiten dargestellt.

Um die Auswirkung der Reduktion der Standardabweichungen zu verdeutlichen, wurden pauschal die Standardabweichungen aller Prozesszeiten innerhalb der Simulation durch einen Parameter („Teiler der Standardabweichungen“) geteilt.

Die Ergebnisse für die Entwicklung der Wartezeiten an Bagger 1 und 2 sind in Abbildung 8-28 und Abbildung 8-29 dargestellt.

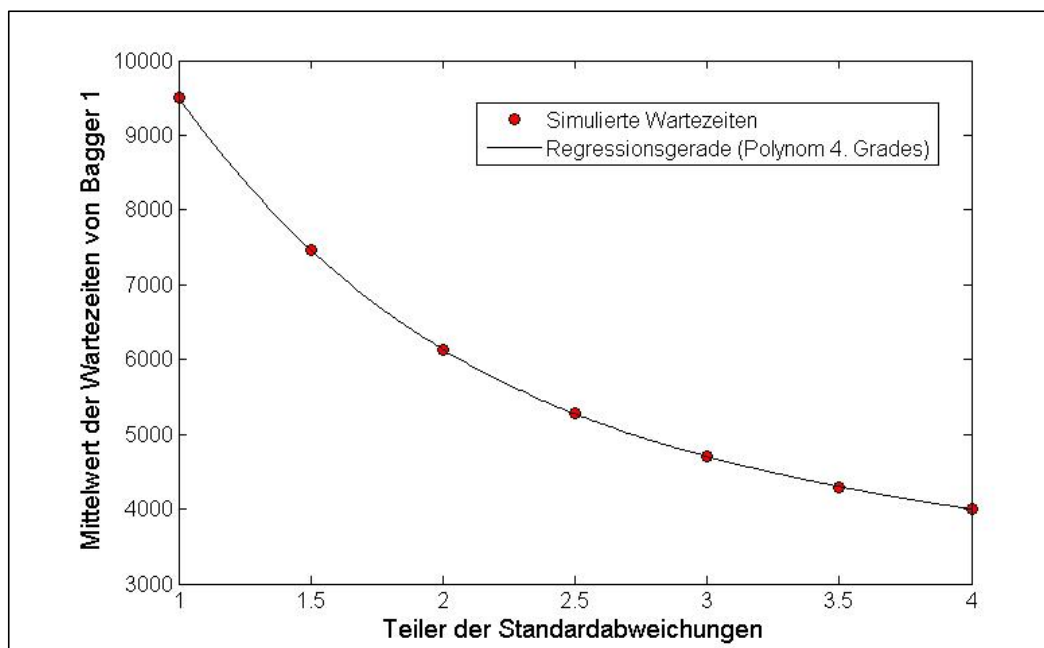


Abbildung 8-28: Entwicklung der Mittelwerte der Wartezeiten von Bagger 1 in Abhängigkeit von der Standardabweichung aller Prozesszeiten

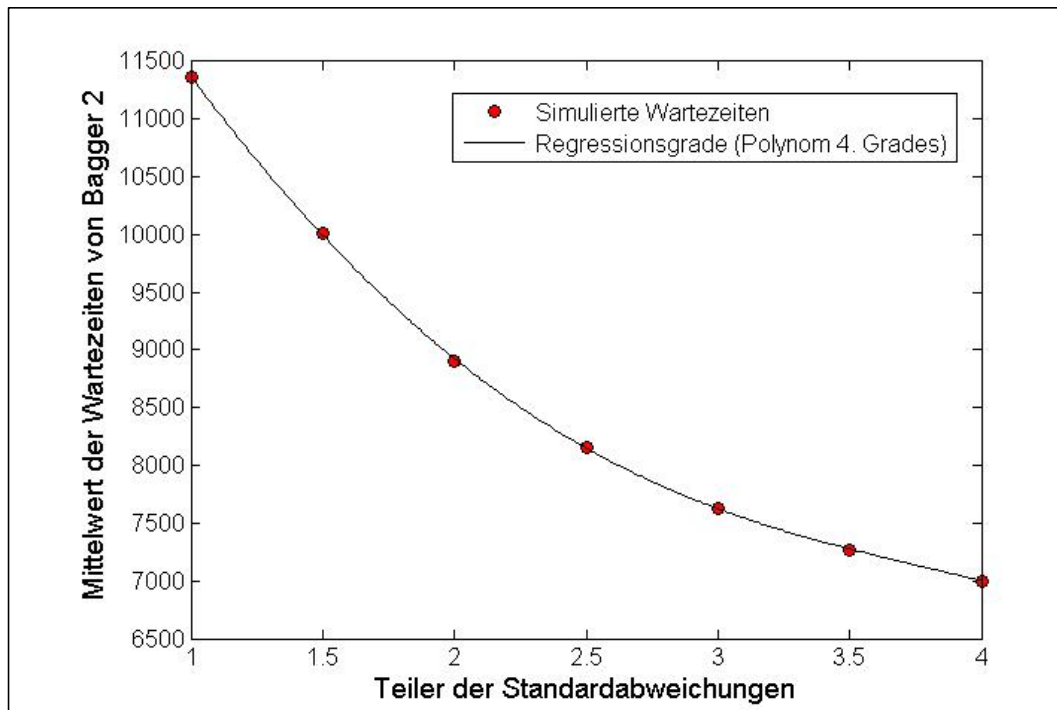


Abbildung 8-29: Entwicklung der Mittelwerte der Wartezeiten von Bagger 2 in Abhängigkeit von der Standardabweichung aller Prozesszeiten

Sowohl in Abbildung 8-28 als auch in Abbildung 8-29 ist deutlich zu erkennen, dass der Einfluss der Reduktion der Standardabweichung auf die Entwicklung des Mittelwerts der Wartezeiten mit sinkender Standardabweichung abnimmt. Dies hat zur Konsequenz, dass die Reduktion der Standardabweichungen insbesondere zu Beginn sehr vielversprechend ist. Eine Halbierung der Standardabweichungen innerhalb des Systems führt zu einer Reduktion der Wartezeiten um ca. 36% für Bagger 1 und ca. 22% für Bagger 2.

In Abbildung 8-30 und Abbildung 8-31 ist die Entwicklung der Standardabweichung der Wartezeiten der Bagger in Abhängigkeit von der Reduktion der Standardabweichung aller Prozesszeiten dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die Reduktion der Standardabweichungen aller Prozesszeiten auch zu einer starken Reduktion der Standardabweichung der Wartezeiten der Bagger führt.

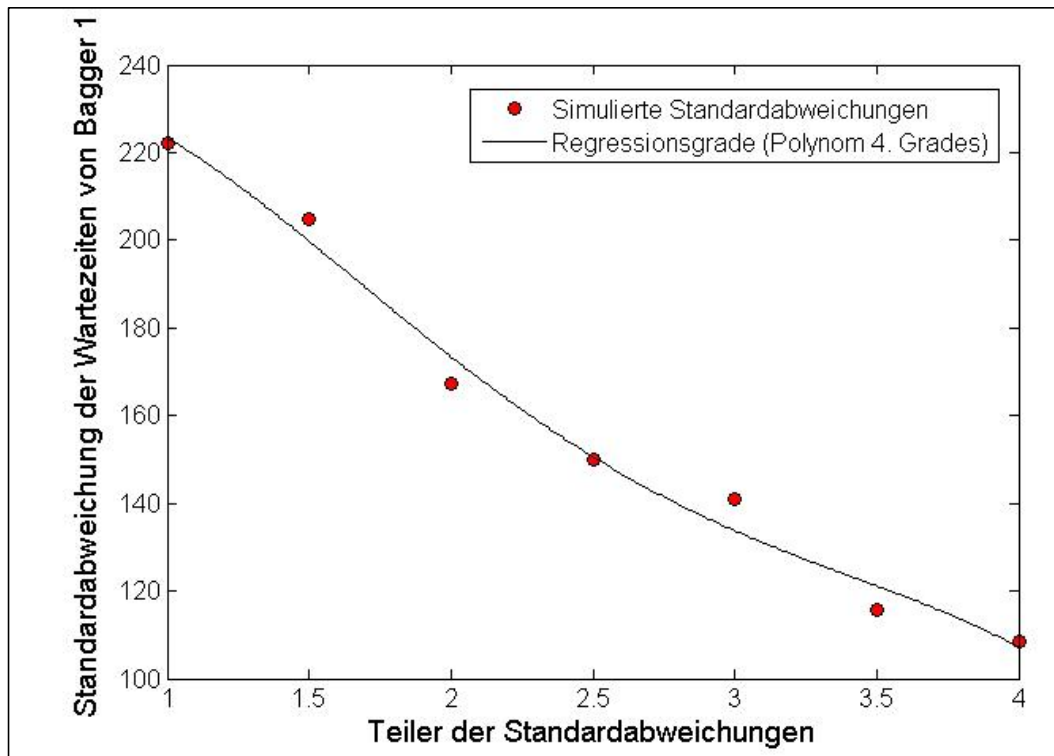


Abbildung 8-30: Entwicklung der Standardabweichung der Wartezeiten von Bagger 1 in Abhängigkeit von der Standardabweichung aller Prozesszeiten

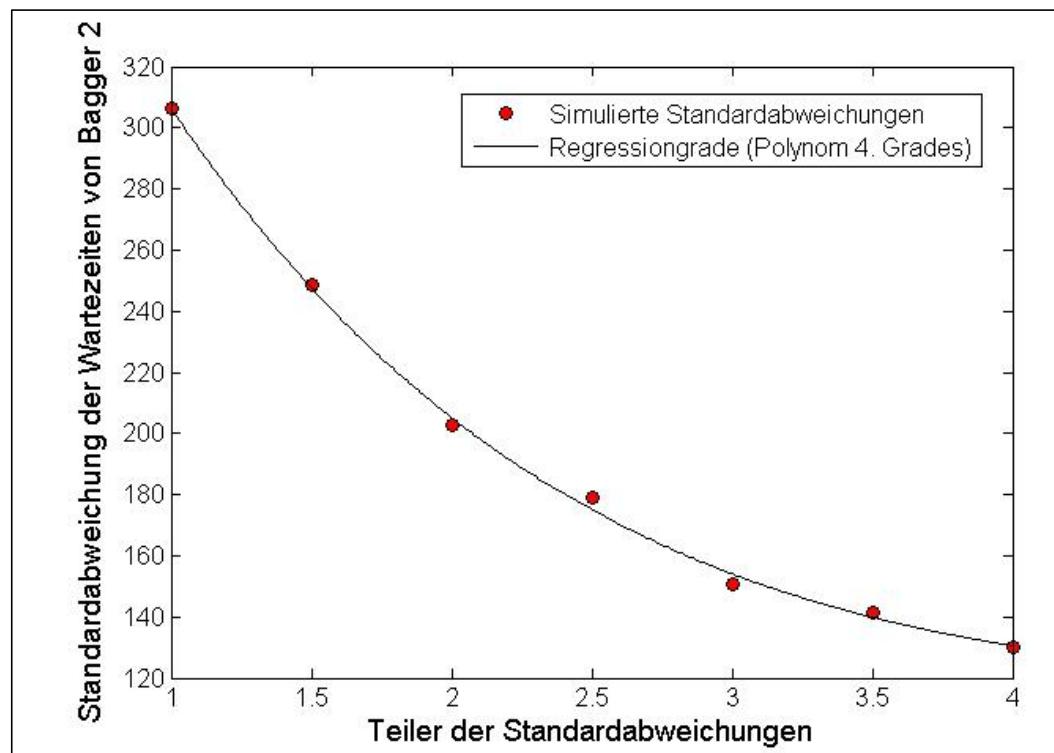


Abbildung 8-31: Entwicklung der Standardabweichung der Wartezeiten von Bagger 2 in Abhängigkeit von der Standardabweichung aller Prozesszeiten

Anhang 12 -Quellcode: Flussoptimierung

```
Steuerungsprinzip=1 %1=Pull 0=Push

for cv2=[0 0.05 0.1 0.2 0.3]

%Anpassung der LKW

for p=1:1000
C_LKW(p,1)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(600,40,60,(sqrt(cv2)*60));
C_LKW(p,2)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(600,240,300,(sqrt(cv2)*300)); % inkl.
60 sec. Abladen
C_LKW(p,3)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(600,200,240,(sqrt(cv2)*240));
end
Anzahl_Transportfahrzeuge=ceil(sum(mean(C_LKW))/60);

Puffer=Anzahl_Transportfahrzeuge

%Ende Anpassung

t=500

Daten_Produktionsprozess(:,1)=[1000,40,60,(sqrt(cv2)*60)] %
Daten_Produktionsprozess=[oben, unten, mean, std] in Sekunden
Daten_Produktionsprozess(:,2)=[600,240,300,(sqrt(cv2)*300)] % inkl. 60 sec.
Abladen
Daten_Produktionsprozess(:,3)=[600,200,240,(sqrt(cv2)*240)]
Daten_Produktionsprozess(:,4)=[1000,40,60,(sqrt(cv2)*60)]

C=size(Daten_Produktionsprozess)
x=C(1,2)

for y=1:1000
h4=0;
v4=0;
h2=0;
h3=0;
hd4=[];
hd3=[];
hd2=[];
V_Control=[];
V_GES=[];
D=[];
D2=[];
h=0;

for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
for b=1:1:x %Produktionsprozesse

D(b,:)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess(1,b),Daten_Produkt
ionsprozess(2,b),Daten_Produktionsprozess(3,b),Daten_Produktionsprozess(4,b
));
V_GES(d,b)=max(D(b,:));

end
end
V_GES_c=V_GES;

for d=1:1:t %Multiplikator für Losgröße
```

```
for f=1:1:x %Einzelne Arbeitsstation

    if d==1
        if f==1
            V_Control(d,f)=V_GES(d,f);
        else
            if f==4
                V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-2))+V_GES(d,f);

            else
                V_Control(d,f)=V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f);
            end
        end
    else

        if f==2 %Hinweg

            if d>Anzahl_Transportfahrzeuge+1 && (V_Control((d-1-
Anzahl_Transportfahrzeuge),4)>V_Control((d-Anzahl_Transportfahrzeuge),2));

                v=0;

                while (V_Control((d-v-Anzahl_Transportfahrzeuge-
1),4)>V_Control(d-Anzahl_Transportfahrzeuge,2)) && v<d
                    v=v+1;
                    if d==v+1+Anzahl_Transportfahrzeuge
                        break
                    end
                end
                if v>20 %Ab wann reagieren LKW-Fahrer
                    b=2;

Verlaengerte_Prozessdauer=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess
(1,b),Daten_Produktionsprozess(2,b),(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v*2),(sq
rt(cv2)*(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v*2)));
                V_GES_c(d,f)= Verlaengerte_Prozessdauer;

                V_Control(d,f)= max((V_Control((d-
1),f)+25),(V_Control(d,(f-1))+Verlaengerte_Prozessdauer));

            else
                V_Control(d,f)= max((V_Control((d-
1),f)+25),(V_Control(d,(f-1))+V_GES(d,f))); %6 Sekunden Mindestabstand
            end

        else

            V_Control(d,f)= max((V_Control((d-1),f)+25),(V_Control(d,(f-
1))+V_GES(d,f))); %6 Sekunden Mindestabstand zwischen den
Transportfahrzeugen
        end

        elseif f==3 %Rückweg

            if d>Anzahl_Transportfahrzeuge+1 && (V_Control((d-1-
Anzahl_Transportfahrzeuge),4)>V_Control((d-Anzahl_Transportfahrzeuge),2));

                v=0;
```

```
        while (V_Control((d-v-Anzahl_Transportfahrzeuge-
1),4)>V_Control(d-Anzahl_Transportfahrzeuge,2)) && v<d
            v=v+1;
            if d==v+1+Anzahl_Transportfahrzeuge
                break
            end
        end
        if v>20 %Ab wann reagieren LKW-Fahrer
            b=3;

Verlaengerte_Prozessdauer=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess
(1,b),Daten_Produktionsprozess(2,b),(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v*2),(sq
rt(cv2)*(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v*2)));
            V_GES_c(d,f)= Verlaengerte_Prozessdauer;

            V_Control(d,f)= max((V_Control((d-1),f)+6),(V_Control(d,(f-
1))+Verlaengerte_Prozessdauer));

        else
            V_Control(d,f)= max((V_Control((d-1),f)+6),(V_Control(d,(f-
1))+V_GES(d,f))); %6 Sekunden Mindestabstand zwischen den
Transportfahrzeugen
        end

    else

        V_Control(d,f)= max((V_Control((d-1),f)+6),(V_Control(d,(f-
1))+V_GES(d,f))); %6 Sekunden Mindestabstand zwischen den
Transportfahrzeugen
        end

elseif f==4 %Prozess 3

    if d>1 && (V_Control((d-1),4)>V_Control(d,2));

        v=0;

        while (V_Control((d-v-1),4)>V_Control(d,2)) && v<d
            v=v+1;
            if d==v+1
                break
            end
        end
        b=4;

Verlaengerte_Prozessdauer=Fahrzeiten_norm_begrenzt(Daten_Produktionsprozess
(1,b),(Daten_Produktionsprozess(2,b)+v),(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v),(
sqrt(cv2)*(Daten_Produktionsprozess(3,b)+v)));
        V_GES_c(d,f)= Verlaengerte_Prozessdauer;

        V_Control(d,f)=max(V_Control((d-
1),f)+Verlaengerte_Prozessdauer,V_Control(d,(f-
2))+Verlaengerte_Prozessdauer);
        h4=h4+1;
        hd4=vertcat(hd4,d);
        v4=vertcat(v4,v);

    else
```

```
V_Control(d,f)=max(V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control(d,(f-2))+V_GES(d,f));
end

elseif f==1

    if d<=Anzahl_Transportfahrzeuge
        V_Control(d,f)= V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f);

    else
        V_OP=[V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control((d-
Anzahl_Transportfahrzeuge),(f+2))+V_GES(d,f)] ;
        V_Control(d,f)=max(V_OP);
    end
end

if Steuerungsprinzip==1
    if f==1&&(d>Puffer)&&(V_Control((d-Puffer),x)>V_Control((d-1),1));

        if d<=Anzahl_Transportfahrzeuge
            V_Control(d,1)=V_Control((d-Puffer),x)+V_GES(d,f);

        else
            V_Control(d,1)=max(V_Control((d-
Puffer),x)+V_GES(d,f),V_Control((d-
Anzahl_Transportfahrzeuge),(f+2))+V_GES(d,f));
            h=h+1;
        end
    end
end
end
end
end
end

V_Fertig (y,:)= V_Control(d,:);

%Wartezeiten
for f=1:1:x

    if f==2
        V_Warte(y,f)= 0;
        V_Warte_proz(y,f)=0;
    elseif f==3
        V_Warte(y,f)=V_Control(d,x)-
(sum(V_GES(:,f))/Anzahl_Transportfahrzeuge)-(sum(V_GES(:,(f-
1)))/Anzahl_Transportfahrzeuge)-
(sum(V_GES(:,1))/Anzahl_Transportfahrzeuge);
        V_Warte_proz(y,f)=1-(V_Warte(y,f)/V_Control(d,x));
    else
        V_Warte(y,f)=V_Control(d,x)-sum(V_GES_c(:,f));
        V_Warte_proz(y,f)=1-(V_Warte(y,f)/V_Control(d,x));
    end
end

end
%DLZ-Messung
for d=1:1:t
    if d==1
        DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
```

```
DLZ_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-((V_Control(d,1))-V_GES(d,1));    %-
V_GES, da das auch Durchlaufzeit ist!
end
end
%Through-Put
for d=1:1:t
    if d==1
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x); %jeweils auf letzten Prozess=x
    else
        TH_Fertig(y,d)=V_Control(d,x)-V_Control((d-1),x);
    end

end
Fertigstellung(y,1)=V_Control(d,1);
Fertigstellung(y,2)=V_Control(d,3);
Fertigstellung(y,3)=V_Control(d,4);
end

for a=1:t
    if a==1
        A=DLZ_Fertig(:,1);
        B=TH_Fertig(:,1);
    else
        A=vertcat(A,DLZ_Fertig(:,a));
        B=vertcat(B,TH_Fertig(:,a));
    end
end

V_Fertigstellung=mean (Fertigstellung);
V_Fertigstellung_std=std (Fertigstellung);
std1_TH1=mean(TH_Fertig);
std1_TH=std(std1_TH1);
std2_TH=std(B);
mean_DLZ=mean(A);
mean_TH=mean(B);
mean_V_Warte_proz=mean(V_Warte_proz);

if cv2==0

V_Fertigstellung_ges=V_Fertigstellung
V_Fertigstellung_std_ges=V_Fertigstellung_std;
V_W_ges=mean_V_Warte_proz
V_std1_TH=std1_TH;
V_std2_TH=std2_TH;
V_mean_DLZ=mean_DLZ;
V_mean_TH=mean_TH

A_LKW=Anzahl_Transportfahrzeuge
V_A_LKW=A_LKW

else

V_Fertigstellung_ges=vertcat(V_Fertigstellung_ges, V_Fertigstellung)
V_Fertigstellung_std_ges=vertcat(V_Fertigstellung_std_ges,V_Fertigstellung_std);
V_W_ges= vertcat(V_W_ges,mean_V_Warte_proz);

V_std1_TH=vertcat(V_std1_TH,std1_TH);
V_std2_TH=vertcat(V_std2_TH,std2_TH);
V_mean_DLZ=vertcat(V_mean_DLZ,mean_DLZ);
V_mean_TH=vertcat(V_mean_TH, mean_TH);
```

```
A_LKW=Anzahl_Transportfahrzeuge;
V_A_LKW=vertcat(V_A_LKW,A_LKW);

end
if cv2==0
    subplot (2,2,1)
    hist(Fertigstellung (:,1),60)
    title('Prozess1')
    subplot (2,2,2)
    hist(Fertigstellung (:,2),60)
    title('Prozess2')
    subplot (2,2,3)
    hist(Fertigstellung (:,3),60)
    title('Prozess3')

    saveas(gcf,'Fertigstellung-cv0.fig')
elseif cv2==0.05
    subplot (2,2,1)
    hist(Fertigstellung (:,1),60)
    title('Prozess1')
    subplot (2,2,2)
    hist(Fertigstellung (:,2),60)
    title('Prozess2')
    subplot (2,2,3)
    hist(Fertigstellung (:,3),60)
    title('Prozess3')

    saveas(gcf,'Fertigstellung-005.fig')
elseif cv2==0.1
    subplot (2,2,1)
    hist(Fertigstellung (:,1),60)
    title('Prozess1')
    subplot (2,2,2)
    hist(Fertigstellung (:,2),60)
    title('Prozess2')
    subplot (2,2,3)
    hist(Fertigstellung (:,3),60)
    title('Prozess3')

    saveas(gcf,'Fertigstellung-01.fig')
elseif cv2==0.2
    subplot (2,2,1)
    hist(Fertigstellung (:,1),60)
    title('Prozess1')
    subplot (2,2,2)
    hist(Fertigstellung (:,2),60)
    title('Prozess2')
    subplot (2,2,3)
    hist(Fertigstellung (:,3),60)
    title('Prozess3')

    saveas(gcf,'Fertigstellung-02.fig')

elseif cv2==0.3
    subplot (2,2,1)
    hist(Fertigstellung (:,1),60)
    title('Prozess1')
    subplot (2,2,2)
    hist(Fertigstellung (:,2),60)
    title('Prozess2')
```

```

subplot (2,2,3)
hist(Fertigstellung (:,3),60)
title('Prozess3')

saveas(gcf,'Fertigstellung-03.fig')
end
end
Uebersicht=horzcat(V_mean_DLZ, V_mean_TH, V_std2_TH)

V_W_final=horzcat(V_W_ges(:,1),V_W_ges(:,3),V_W_ges(:,4))

xlswrite ('Endausgabe-Handlungsempfehlung-neu2.xls', Uebersicht,'B3:D7');
xlswrite ('Endausgabe-Handlungsempfehlung-neu2.xls', V_A_LKW,'E3:E7');
xlswrite ('Endausgabe-Handlungsempfehlung-neu2.xls', V_W_final,'C10:E14');
xlswrite ('Endausgabe-Handlungsempfehlung-neu2.xls',
V_Fertigstellung_ges,'C17:E21');
xlswrite('Endausgabe-Handlungsempfehlung-neu2.xls',
V_Fertigstellung_std_ges,'C24:E28');

%Checks:

%Check wegen LKW Bedingung

V_Control((d-1),f)+V_GES(d,f),V_Control((d-
Anzahl_Transportfahrzeuge),(f+2))+V_GES(d,f)

V_Kontroll=[]
for d=14:500
    if V_Control((d-Anzahl_Transportfahrzeuge),3)+V_GES_c(d,1)>V_Control((d-
1),1)+V_GES(d,1);
        ui=isempty(V_Kontroll)
        if ui==1
            V_Kontroll=d;
        else
            V_Kontroll=vertcat(V_Kontroll,d);
        end
    end
end

end

%Check für Verteilungen

cv2=0.3

for p=1:1000
    C_LKW(p)=Fahrzeiten_norm_begrenzt(1000,40,60,(sqrt(cv2)*60));
end

histfit(C_LKW)

```


Anhang 13 – Detaillierte Erläuterung der Simulationsergebnisse von Kapitel 6.1.2

Ein Produktionssystem wird, für einen bestimmten Basis-Fall ausgelegt. Im Basis-Fall wird davon ausgegangen, dass alle Produktionsprozesse „optimal“ bzgl. ihres Mittelwerts aufeinander abgestimmt sind. Der Basis-Fall ist gleichzeitig die Ausgangssituation der Verbesserung- und Verschlechterung-Fälle. Während der Produktion ergeben sich unterschiedliche Sachverhalte, die zu Abweichungen vom Basis-Fall führen. Diese Abweichungen entsprechen bzgl. ihrer Auswirkungen den Verbesserungs- und Verschlechterung-Fällen. Eine Anpassung der Anzahl der Transportfahrzeuge an die neuen Prozessdauern wurde nicht vorgenommen, da das Produktionssystem für den Basis-Fall ausgelegt wird.

Die Anzahl der Transportfahrzeuge wurde entsprechend der traditionellen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 3) durch:

$$n_{LKW} = \frac{\mu_{t_{Runde}}}{\mu_{t_{Beladen}}} \quad (8.1)$$

n_{LKW}	<i>Anzahl der eingesetzten Transportfahrzeuge [-]</i>
$\mu_{t_{Runde}}$	<i>Erwartungswert der Dauer für einen Transportvorgang (d.h. Beladezeit + ges. Fahrzeit + Abladezeit) [s]</i>
$\mu_{t_{Beladen}}$	<i>Erwartungswert der Beladezeit der Transportfahrzeuge [s]</i>

bestimmt. Es wurde eine Fahrdistanz von 2 Kilometern und für den Basis-Fall eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h angenommen. Für den Abladevorgang wurde ein Mittelwert von 60 sec. angenommen. Aufgrund der Wahl der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist eine Anpassung der LKW-Anzahl in Abhängigkeit von dem gewählten Variationskoeffizienten erforderlich. Dies resultiert daher, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen linksseitig beschränkt wurden, um unrealistisch niedrige oder gar negative Prozessdauern zu vermeiden. Diese Beschränkung hat zur Folge, dass, sobald der Variationskoeffizient verändert wird, eine rechtsseitige Verschiebung des Erwartungswerts erfolgt. Eine Verschiebung des Erwartungswerts hat nach Formel 8.1 wiederum eine Neubestimmung der Anzahl der eingesetzten Transportfahrzeuge zur Folge. Würde diese Anpassung nicht erfolgen, so steigt mit steigendem Variationskoeffizienten die Wahrscheinlichkeit, dass der „Transportieren“-Prozess zum Engpass wird. Für den Basis-Fall wurde des Weiteren angenommen, dass die Prozesse „Lösen&Laden“ und „Verteilen“ einen Mittelwert von 60 sec. haben. Die Standardabweichung wurde durch den vorgegebenen Variationskoeffizienten bestimmt.

Simuliert wird der Aushub und Einbau von 500 Transportfahrzeugladungen. Des Weiteren wurden jeweils 1000 Simulationen durchgeführt, um repräsentative Werte der stochastischen Verteilungen zu erhalten.

Im Folgenden werden die einzelnen Fälle exemplarisch analysiert. Das Ziel ist, anhand einer Sensitivitätsanalyse zu beurteilen, ob das Push- oder Pull-Prinzip zu besseren Systemergebnissen führt.

Basis-Fall - Systemverhalten in Abhängigkeit des angewandten Steuerungsprinzip

Ergebnisse: Push-Prinzip

In Tabelle 8-3 sind die Ergebnisse der Simulation unter Verwendung einer Push-Steuerung für unterschiedliche Variationskoeffizienten CV^2 dargestellt. Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass mit steigendem CV^2 -Wert ebenfalls:

- die mittlere Durchlaufzeit μ -DLZ,
- die mittlere Zwischenfertigstellungszeit μ -ZfZ,
- die Standardabweichung der mittlere Zwischenfertigstellungszeit σ -ZfZ
- die mittlere Fertigstellungszeit der gesamten Aufträge μ_{ges} und
- die Standardabweichung der Fertigstellungszeit der gesamten Aufträge σ_{ges}

steigen. Gleichzeitig sinkt die Auslastung des betrachteten Produktionsausschnitts mit steigendem CV^2 -Wert.

Anhand der μ_{ges} -Werte ist deutlich zu erkennen, dass Prozess 3, aufgrund des in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Zusammenhangs zwischen der Anzahl der im Voraus abgeladenen Transportfahrzeug-Ladungen und der Zunahme der Prozessdauer von „Verteilen“-Prozesses, „automatisch“ zum Engpass wird (vgl. Tabelle 8-3 - dies gilt für CV^2 -Wert grösser Null). Hierdurch steigt die Prozessdauer kontinuierlich mit Zunahme der im Voraus abgeladenen Transportfahrzeug-Ladungen an. Der Anstieg nimmt mit steigendem Variationskoeffizienten deutlich zu. Die Wahrscheinlichkeit für ein schnelles Auftreten der Zunahme der Prozessdauer des „Verteilen“-Prozesses steigt mit größer werdenden CV^2 -Werten. Ab einem gewissen Punkt „kollabiert“ das System für höhere CV^2 -Werte und der „Verteilen“-Prozesses wird unwiderruflich zum Engpass.

Bei den Ergebnissen handelt es sich um qualitative Aussagen. Obwohl die Simulation eine teilweise Gegensteuerung der Transportfahrzeuge beinhaltet (konkret werden die Transportfahrzeuge ab einem gewissen Punkt umso langsamer, je mehr Bestände in Form von abgeladenen Transportfahrzeug-Ladungen sich vor dem „Verteilen“-Prozess ansammeln), sammeln sich immer mehr Bestände vor dem „Verteilen“-Prozess an. In der baubetrieblichen Realität würde die Bauleitung bzw. der Polier oder sonstige Projektbeteiligte eingreifen, bevor das System komplett „kollabiert“. Dieser Eingriff wurde beabsichtigt nicht simuliert, da je nach installierten Controllings-Mechanismen ein früherer oder späterer Eingriff stattfindet. Je später der Eingriff stattfindet, desto stärker wird der „Verteilen“-Prozess zum Engpass und desto länger ist die benötigte Fertigstellungszeit des gesamten Auftrags (hier: 500 Transportfahrzeug-Ladungen).

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	420	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	585	69	27	11
$CV^2 = 0.1$	1511	80	34	12
$CV^2 = 0.2$	4673	111	56	13
$CV^2 = 0.3$	5312	120	64	13

Auslastung	Prozess 1 [-]	Prozess 2 [-]	Prozess 3 [-]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,89	0,85	0,93
$CV^2 = 0.1$	0,83	0,72	0,96
$CV^2 = 0.2$	0,66	0,53	0,98
$CV^2 = 0.3$	0,65	0,52	0,98

μ - t_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30360
$CV^2 = 0.05$	34047	34660	34682
$CV^2 = 0.1$	35836	36585	40103
$CV^2 = 0.2$	38777	39676	55614
$CV^2 = 0.3$	40747	41654	60218

σ - t_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	345	363	1126
$CV^2 = 0.1$	1020	1108	6017
$CV^2 = 0.2$	850	905	10720
$CV^2 = 0.3$	629	674	12345

Tabelle 8-3: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip³⁹⁹

³⁹⁹ Einheit s = Sekunden (alternativ Zeiteinheiten); CV = Variationskoeffizient; μ -DLZ = Mittelwert der Durchlaufzeiten; μ -ZfZ = Mittelwert der Zwischenfertigstellungszeiten; σ -ZfZ = Standardabweichung der Zwischenfertigstellungszeiten; Anzahl TF = Anzahl der eingesetzten Transportfahrzeuge; μ_{ges} = Mittelwert der Fertigstellungstermine; σ_{ges} = Standardabweichung der Fertigstellungstermine.

Ergebnisse: Pull-Prinzip

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	420	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	549	69	27	11
$CV^2 = 0.1$	674	72	28	12
$CV^2 = 0.2$	862	79	31	13
$CV^2 = 0.3$	909	84	35	13

Auslastung	Prozess 1 [-]	Prozess 2 [-]	Prozess 3 [-]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,90	0,85	0,92
$CV^2 = 0.1$	0,90	0,79	0,95
$CV^2 = 0.2$	0,90	0,72	0,97
$CV^2 = 0.3$	0,89	0,71	0,97

μ - t_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30360
$CV^2 = 0.05$	34022	34635	34514
$CV^2 = 0.1$	35394	36061	36013
$CV^2 = 0.2$	38494	39232	39331
$CV^2 = 0.3$	41036	41815	41909

σ - t_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	262	269	263
$CV^2 = 0.1$	334	341	339
$CV^2 = 0.2$	599	602	637
$CV^2 = 0.3$	652	655	696

Tabelle 8-4: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert=Anzahl der Transportfahrzeuge)

Tabelle 8-4 stellt die Ergebnisse der Simulation für unterschiedliche Variationskoeffizienten CV^2 bei der Umsetzung des Pull-Prinzips dar. Mit steigendem CV^2 -Wert steigen ebenfalls:

- die mittlere Durchlaufzeit μ -DLZ,
- die mittlere Zwischenfertigstellungszeit μ -ZfZ,
- die Standardabweichung der mittlere Zwischenfertigstellungszeit σ -ZfZ
- die mittlere Fertigstellungszeit der gesamten Aufträge μ_{ges} und
- die Standardabweichung der Fertigstellungszeit der gesamten Aufträge σ_{ges} .

Gleichzeitig sinkt die Auslastung leicht mit steigendem CV^2 -Wert.

Gegenüber den Ergebnisse des Push-Prinzips weisen die Ergebnisse des Pull-Prinzips (vgl. Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4) eine deutlich niedrige Steigerung der Werte: μ -DLZ, μ -ZFZ, σ -ZFZ, μ_{ges} und σ_{ges} bei steigenden CV^2 auf. Besonders deutlich ist die Differenz zum einen anhand der Auslastung erkennbar. Die Umsetzung des Pull-Prinzips realisiert eine deutlich höhere Auslastung bei einem gegebenen Variationskoeffizienten CV^2 , als die Umsetzung des Push-Prinzips. Zum anderen ist die Standardabweichung der Fertigstellungszeit (σ_{ges}) bei der Umsetzung des Pull-Prinzips wesentlich geringer. Ein geringerer σ_{ges} -Wert ist gleichzusetzen mit einer besseren Planbarkeit der Fertigstellung.

Durch die Begrenzung der maximal im System befindlichen Anzahl der Zwischenprodukte wird bei dem Pull-Prinzip verhindert, dass am „Verteilen“-Prozess sehr hohe Prozessdauern auftreten.

Deutlich zu erkennen an den Simulationsergebnissen für die CV^2 -Werte 0 bzw. 0,05 ist, dass für kleine Variationskoeffizienten der Vorteil des Pull-Prinzips abnimmt bzw. verschwindet.

Die Wahl der CONWIP-Limitierung hat wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten (vgl. Tabelle 8-5, Tabelle 8-6 und Tabelle 8-7). Für das jeweilige Produktionssystem ist die optimale CONWIP-Limitierung zu wählen. Für hohe CONWIP-Limitierungen gehen die Vorteile der CONWIP-Steuerung verloren (vgl. Tabelle 8-6). Für zu niedrige CONWIP-Limitierungen sinken die Auslastungen unverhältnismäßig, sodass sehr lange Fertigstellungszeiten (μ_{ges}) und hohe Zwischenfertigstellungszeiten (μ -ZFZ)⁴⁰⁰ auftreten (vgl. Tabelle 8-7 und Abbildung 8-32). Diese Aussagen treffen für alle CONWIP-Steuerungen zu (unabhängig von der jeweiligen Fallunterscheidung).

⁴⁰⁰ Hohe Zwischenfertigstellungszeiten haben bei einer Kopplung zu weiteren Produktionsprozessen entweder hohe Bestände oder eine geringe Auslastung des nachfolgenden Prozesses zur Folge.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	420	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	540	69	27	11
$CV^2 = 0.1$	626	72	29	12
$CV^2 = 0.2$	742	78	32	13
$CV^2 = 0.3$	782	83	36	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,89	0,85	0,92
$CV^2 = 0.1$	0,90	0,79	0,94
$CV^2 = 0.2$	0,91	0,73	0,96
$CV^2 = 0.3$	0,90	0,72	0,96

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30360
$CV^2 = 0.05$	34110	34716	34588
$CV^2 = 0.1$	35510	36178	36073
$CV^2 = 0.2$	38204	38949	38877
$CV^2 = 0.3$	40722	41506	41440

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	247	251	248
$CV^2 = 0.1$	299	306	305
$CV^2 = 0.2$	399	416	410
$CV^2 = 0.3$	459	468	469

Tabelle 8-5: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert=4/5 x Anzahl der Transportfahrzeuge)

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	420	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	565	69	27	11
$CV^2 = 0.1$	1014	76	29	12
$CV^2 = 0.2$	1637	88	33	13
$CV^2 = 0.3$	1752	94	37	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,89	0,85	0,93
$CV^2 = 0.1$	0,86	0,75	0,96
$CV^2 = 0.2$	0,80	0,64	0,98
$CV^2 = 0.3$	0,80	0,63	0,98

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30360
$CV^2 = 0.05$	34051	34663	34582
$CV^2 = 0.1$	36618	37286	38066
$CV^2 = 0.2$	42010	42745	44243
$CV^2 = 0.3$	44772	45547	47166

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	407	408	569
$CV^2 = 0.1$	1832	1828	2408
$CV^2 = 0.2$	2273	2277	2497
$CV^2 = 0.3$	2379	2378	2579

Tabelle 8-6: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert= 25 Transportfahrzeuge)

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	420	140	114	10
$CV^2 = 0.05$	460	154	91	11
$CV^2 = 0.1$	493	166	104	12
$CV^2 = 0.2$	536	181	118	13
$CV^2 = 0.3$	562	190	125	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,43	0,43	0,43
$CV^2 = 0.05$	0,40	0,38	0,40
$CV^2 = 0.1$	0,39	0,34	0,39
$CV^2 = 0.2$	0,39	0,31	0,39
$CV^2 = 0.3$	0,39	0,31	0,40

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	69840	70380	70200
$CV^2 = 0.05$	76834	77424	77231
$CV^2 = 0.1$	82475	83111	82905
$CV^2 = 0.2$	89922	90619	90389
$CV^2 = 0.3$	94429	95168	94920

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	544	547	548
$CV^2 = 0.1$	727	732	730
$CV^2 = 0.2$	877	882	881
$CV^2 = 0.3$	942	937	933

Tabelle 8-7: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert= 3 Transportfahrzeuge)

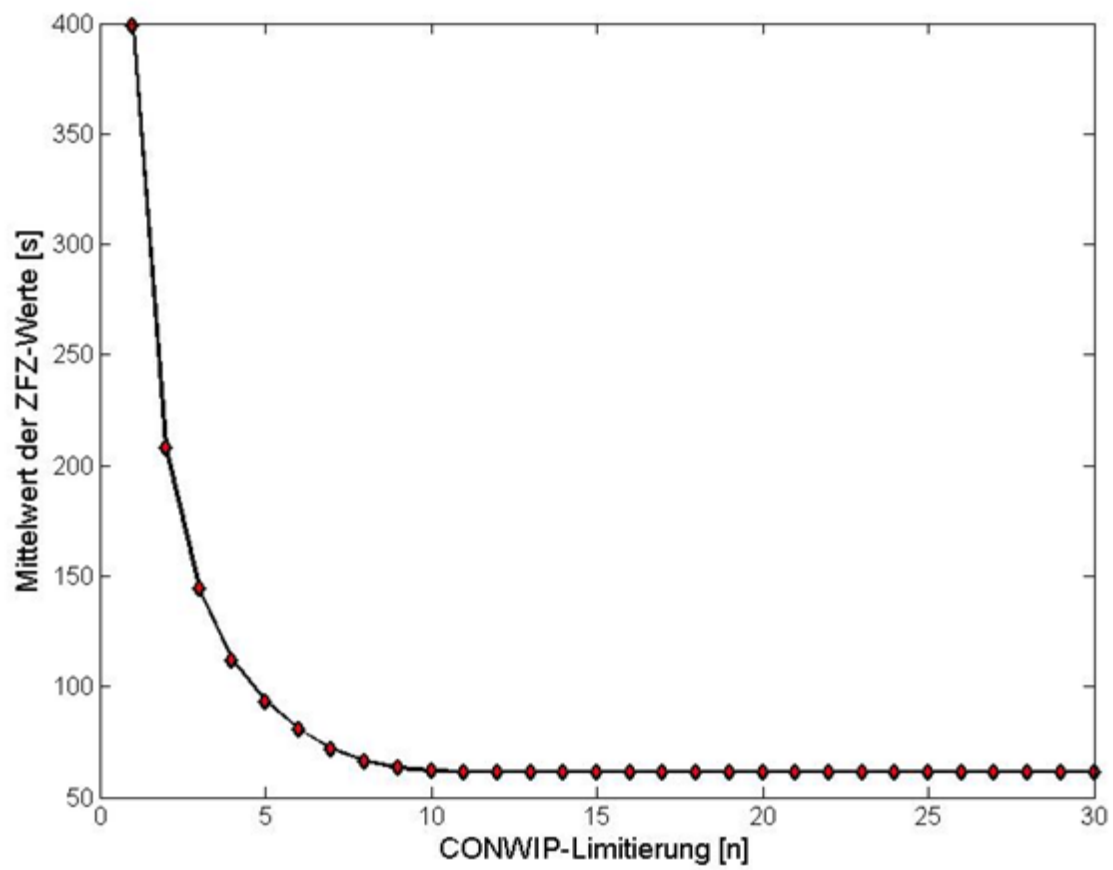


Abbildung 8-32: Qualitative Darstellung des Zusammenhangs der Conwip-Limitierung und der Entwicklung der Zwischenfertigstellungszeiten

Sensitivitätsanalyse – Verschlechterungen und Verbesserungen gegenüber dem Basis-Fall und Auswirkungen auf das Systemverhalten in Abhängigkeit des angewandten Steuerungsprinzip

Verschlechterung Fall-1

Der Verschlechterungs Fall-1 zeichnet sich dadurch aus, dass der „Lösen&Laden“-Prozess (temporär) langsamer als im Basis-Fall angenommen arbeitet. Innerhalb der Analyse werden zwei Szenarien untersucht:

- Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauern von „Lösen&Laden“ um 10% und
- Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauern von „Lösen&Laden“ um 25%.

Die Standardabweichungen werden über den vorgegebenen Variationskoeffizienten bestimmt. In Tabelle 8-8 und Tabelle 8-9 sind die Simulationsergebnisse für die Push-Steuerung und in Tabelle 8-10 und Tabelle 8-11 sind die Ergebnisse für die Pull-Steuerung dargestellt. Anhand der in den Tabellen dargestellten Ergebnisse der mittleren Fertigstellungszeiten der gesamten Aufträge μ_{ges} und der Standardabweichung der Fertigstellungszeit der gesamten Aufträge σ_{ges} ist zu erkennen, dass bei einer Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauer um 10% der Unterschied zwischen einer Pull- und Push-Steuerung erheblich ist – insbesondere für höhere vc^2 -Werte (vgl. Tabelle 8-8 und Tabelle 8-10). Für geringe Steigerungen des Mittelwerts der Prozessdauern von „Laden&Lösen“ hat eine Pull-Steuerung deutlich geringere mittlere Fertigstellungszeiten (μ_{ges}) und Standardabweichung der Fertigstellungsdauern (σ_{ges}) sowie höhere mittlere Auslastungen als eine Push-Steuerung.

Demgegenüber ist der Unterschied zwischen einer Push- und Pull-Steuerung für größere Steigerungen der Prozessdauer des „Laden&Lösen“-Prozesses kaum ersichtlich. Dies folgt daher, dass je ausgeprägter der Engpass am „Laden&Lösen“-Prozess ist, desto stärker wird der simulierte Produktionsausschnitt durch diesen bestimmt (vgl. Tabelle 8-9 und Tabelle 8-11).

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	426	67	16	10
$CV^2 = 0.05$	530	71	30	11
$CV^2 = 0.1$	646	75	33	12
$CV^2 = 0.2$	1349	85	40	13
$CV^2 = 0.3$	1593	92	45	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,91	0,90
$CV^2 = 0.05$	0,94	0,83	0,89
$CV^2 = 0.1$	0,94	0,77	0,91
$CV^2 = 0.2$	0,90	0,68	0,94
$CV^2 = 0.3$	0,89	0,66	0,94

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	33000	33540	33360
$CV^2 = 0.05$	35237	35847	35701
$CV^2 = 0.1$	36571	37241	37269
$CV^2 = 0.2$	39196	39970	42652
$CV^2 = 0.3$	41693	42506	46169

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	262	267	260
$CV^2 = 0.1$	371	383	1108
$CV^2 = 0.2$	524	563	6161
$CV^2 = 0.3$	496	521	6922

Tabelle 8-8: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Steigerung der Prozessdauern von „Lösen&Laden“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	435	76	16	10
$CV^2 = 0.05$	515	77	36	11
$CV^2 = 0.1$	575	80	41	12
$CV^2 = 0.2$	650	86	45	13
$CV^2 = 0.3$	689	91	48	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,81	0,79
$CV^2 = 0.05$	0,98	0,77	0,82
$CV^2 = 0.1$	0,98	0,73	0,83
$CV^2 = 0.2$	0,98	0,67	0,85
$CV^2 = 0.3$	0,98	0,67	0,85

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	37500	38040	37860
$CV^2 = 0.05$	38206	38810	38646
$CV^2 = 0.1$	39597	40253	40093
$CV^2 = 0.2$	42380	43116	42949
$CV^2 = 0.3$	44990	45764	45597

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	327	333	330
$CV^2 = 0.1$	429	430	428
$CV^2 = 0.2$	554	560	546
$CV^2 = 0.3$	643	649	647

Tabelle 8-9: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Steigerung der Prozessdauer von „Lösen&Laden“ um 25%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	426	67	16	10
$CV^2 = 0.05$	530	71	30	11
$CV^2 = 0.1$	611	74	33	12
$CV^2 = 0.2$	731	80	35	13
$CV^2 = 0.3$	780	85	39	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,91	0,90
$CV^2 = 0.05$	0,94	0,83	0,89
$CV^2 = 0.1$	0,95	0,77	0,91
$CV^2 = 0.2$	0,95	0,72	0,93
$CV^2 = 0.3$	0,95	0,71	0,93

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	33000	33540	33360
$CV^2 = 0.05$	35243	35850	35708
$CV^2 = 0.1$	36583	37252	37126
$CV^2 = 0.2$	39184	39915	39848
$CV^2 = 0.3$	41761	42541	42477

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	266	274	268
$CV^2 = 0.1$	338	344	340
$CV^2 = 0.2$	424	433	426
$CV^2 = 0.3$	493	504	514

Tabelle 8-10: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung = Anzahl der eingesetzten Transportfahrzeuge) für die Steigerung der Prozessdauern von „Lösen&Laden“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	435	76	16	10
$CV^2 = 0.05$	514	77	36	11
$CV^2 = 0.1$	575	80	41	12
$CV^2 = 0.2$	649	86	45	13
$CV^2 = 0.3$	687	91	48	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,81	0,79
$CV^2 = 0.05$	0,98	0,77	0,81
$CV^2 = 0.1$	0,98	0,72	0,83
$CV^2 = 0.2$	0,98	0,67	0,85
$CV^2 = 0.3$	0,98	0,67	0,85

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	37500	38040	37860
$CV^2 = 0.05$	38231	38832	38668
$CV^2 = 0.1$	39602	40262	40099
$CV^2 = 0.2$	42334	43064	42901
$CV^2 = 0.3$	45003	45774	45599

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	310	315	311
$CV^2 = 0.1$	416	423	417
$CV^2 = 0.2$	549	558	550
$CV^2 = 0.3$	619	626	619

Tabelle 8-11: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung = Anzahl der eingesetzten Transportfahrzeuge) für die Steigerung der Prozessdauern von „Lösen&Laden“ um 25%

Verschlechterung Fall-2

In diesem Fall arbeitet der „Transportieren“-Prozess langsamer als im Basis-Fall angenommen. Auch für diesen Fall werden zwei Szenarien genauer analysiert:

- Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauern von „Transportieren“ um 10% und
- Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauern von „Transportieren“ um 25%.

Die Simulationsergebnisse für die Push-Steuerung sind in Tabelle 8-12 und Tabelle 8-13 dargestellt, diejenigen für die Pull-Steuerung in Tabelle 8-14 und Tabelle 8-15.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2=0$	450	66	24	10
$CV^2=0.05$	559	73	34	11
$CV^2=0.1$	640	75	34	12
$CV^2=0.2$	1779	88	41	13
$CV^2=0.3$	2793	101	52	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	0,91	0,99	0,91
$CV^2=0.05$	0,85	0,85	0,87
$CV^2=0.1$	0,87	0,81	0,90
$CV^2=0.2$	0,82	0,69	0,95
$CV^2=0.3$	0,77	0,64	0,96

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	32646	33240	33036
$CV^2=0.05$	36110	36772	36607
$CV^2=0.1$	36906	37626	37490
$CV^2=0.2$	38813	39653	44159
$CV^2=0.3$	40990	41872	50584

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	0	0	0
$CV^2=0.05$	302	306	303
$CV^2=0.1$	342	349	435
$CV^2=0.2$	592	643	7247
$CV^2=0.3$	515	552	10434

Tabelle 8-12: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Steigerung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	495	74	44	10
$CV^2 = 0.05$	594	80	44	11
$CV^2 = 0.1$	645	80	43	12
$CV^2 = 0.2$	758	82	39	13
$CV^2 = 0.3$	1182	89	42	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,81	0,99	0,81
$CV^2 = 0.05$	0,77	0,86	0,79
$CV^2 = 0.1$	0,81	0,82	0,83
$CV^2 = 0.2$	0,86	0,78	0,90
$CV^2 = 0.3$	0,85	0,74	0,93

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	36615	37290	37050
$CV^2 = 0.05$	39521	40269	40055
$CV^2 = 0.1$	39546	40345	40126
$CV^2 = 0.2$	40020	40865	40860
$CV^2 = 0.3$	41694	42571	44317

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	347	352	347
$CV^2 = 0.1$	364	378	362
$CV^2 = 0.2$	380	393	1417
$CV^2 = 0.3$	374	388	5053

Tabelle 8-13: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Steigerung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 25%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	450	66	24	10
$CV^2 = 0.05$	559	73	34	11
$CV^2 = 0.1$	635	75	34	12
$CV^2 = 0.2$	781	79	34	13
$CV^2 = 0.3$	841	84	37	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,91	0,99	0,91
$CV^2 = 0.05$	0,85	0,85	0,87
$CV^2 = 0.1$	0,87	0,81	0,90
$CV^2 = 0.2$	0,89	0,75	0,95
$CV^2 = 0.3$	0,89	0,74	0,95

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	32646	33240	33036
$CV^2 = 0.05$	36125	36788	36622
$CV^2 = 0.1$	36923	37641	37491
$CV^2 = 0.2$	38784	39562	39513
$CV^2 = 0.3$	41164	41976	41953

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	302	311	303
$CV^2 = 0.1$	335	338	333
$CV^2 = 0.2$	417	429	440
$CV^2 = 0.3$	518	527	554

Tabelle 8-14: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert= Anzahl Transportfahrzeuge) für die Steigerung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	495	74	44	10
$CV^2 = 0.05$	594	80	44	11
$CV^2 = 0.1$	645	80	43	12
$CV^2 = 0.2$	718	81	39	13
$CV^2 = 0.3$	779	85	40	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,81	0,99	0,81
$CV^2 = 0.05$	0,77	0,86	0,79
$CV^2 = 0.1$	0,81	0,82	0,83
$CV^2 = 0.2$	0,87	0,78	0,90
$CV^2 = 0.3$	0,88	0,76	0,92

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	36615	37290	37050
$CV^2 = 0.05$	39495	40239	40030
$CV^2 = 0.1$	39533	40325	40113
$CV^2 = 0.2$	40031	40875	40676
$CV^2 = 0.3$	41785	42647	42500

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	331	335	328
$CV^2 = 0.1$	365	369	366
$CV^2 = 0.2$	375	385	374
$CV^2 = 0.3$	397	407	408

Tabelle 8-15: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Wert= Anzahl Transportfahrzeuge) für die Steigerung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 25%

Anhand der Simulationsergebnisse ist erkennbar, dass die Auswirkungen von Verschlechterung- Fall 2 stark von der Größe des Unterschieds zwischen den Prozessdauern des Engpasses und den übrigen Produktionsprozessen ist. So ist z.B. bei einer Erhöhung der Mittelwerte der Prozessdauern des Engpasses um 10% anhand der in Tabelle 8-12 und Tabelle 8-14 dargestellten Ergebnisse erkennbar, dass es für kleinere (konkreter ≤ 0.1) Variationskoeffizienten egal ist, ob das Push- oder Pull-Prinzip angewendet wird. Für größere Variationskoeffizienten ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie für den Basis-Fall - die Auswirkungen sind jedoch abgeschwächt.

Je größer der Unterschied zwischen Engpass und den übrigen Produktionsprozessen ist, desto geringer ist der Unterschied zwischen einer Push- und Pull-Steuerung. Anhand des Vergleichs der Ergebnisse

von Tabelle 8-12, Tabelle 8-13, Tabelle 8-14 und Tabelle 8-15 ist des Weiteren erkennbar, dass mit steigendem Unterschied zwischen Engpass und den übrigen Produktionsprozessen die im Basis-Fall festgestellten Unterschiede zwischen Push- und Pull-Steuerung immer schwächer ausfallen. Dies folgt erneut aus der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeit der Dominanz des Engpasses mit größer werdendem Unterschied zwischen Engpass und übriger Produktion deutlich zunimmt.

Verschlechterung Fall-3

Der Verschlechterungsfall Fall-3 widmet sich der Analyse, was passiert, wenn der „Verteilen“ Prozess langsamer als in der Planung (bzw. für den Basis-Fall) angenommen arbeitet. Aufgrund des bestehenden Zusammenhangs zwischen der Menge an Beständen zwischen den Produktionsprozessen „Transportieren“ und „Verteilen“ und der Prozessdauer von „Verteilen“ sowie den Ergebnisse des Basis-Falls ist anzunehmen, dass bei einer Steigerung der Prozessdauer des „Verteilen“-Prozesses eine Verstärkung der im Basis-Fall festgestellten Zusammenhänge auftritt. Aus diesem Grund wird nur der Unterfall:

- Steigerung des Mittelwerts der Prozessdauern von „Verteilen“ um 10%

analysiert. Die Simulationsergebnisse für die Push-Steuerung sind in Tabelle 8-16 und diejenigen für die Pull-Steuerung sind in Tabelle 8-17 dargestellt. Deutlich zu erkennen anhand der Ergebnisse ist eine Verschlechterung der Auslastung und der Fertigstellungszeitpunkte (μ_{ges}). Die Verschlechterung ist im Fall der Pull-Steuerung jedoch deutlich geringer als für den Fall der Push-Steuerung. Eine weitere Senkung der Produktionsgeschwindigkeit von „Verteilen“ würde diesen Effekt verstärken, weshalb auf die Darstellung weiterer Unterfälle verzichtet wurde.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	7599	120	38	10
$CV^2 = 0.05$	4592	106	40	11
$CV^2 = 0.1$	7249	127	56	12
$CV^2 = 0.2$	11209	156	78	13
$CV^2 = 0.3$	12433	169	89	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,50	0,50	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,59	0,56	0,99
$CV^2 = 0.1$	0,52	0,45	0,99
$CV^2 = 0.2$	0,45	0,37	0,99
$CV^2 = 0.3$	0,45	0,36	0,99

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	39580	40584	60138
$CV^2 = 0.05$	38314	39236	52807
$CV^2 = 0.1$	39433	40395	63458
$CV^2 = 0.2$	40226	41191	78228
$CV^2 = 0.3$	41736	42688	84410

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	1265	1310	5144
$CV^2 = 0.1$	800	822	5931
$CV^2 = 0.2$	454	465	7281
$CV^2 = 0.3$	411	423	8962

Tabelle 8-16: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Steigerung der Prozessdauern von „Verteilen“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	690	71	16	10
$CV^2 = 0.05$	748	73	23	11
$CV^2 = 0.1$	871	78	26	12
$CV^2 = 0.2$	1037	85	32	13
$CV^2 = 0.3$	1096	91	36	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,85	0,85	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,85	0,80	0,99
$CV^2 = 0.1$	0,84	0,74	0,98
$CV^2 = 0.2$	0,83	0,67	0,99
$CV^2 = 0.3$	0,83	0,66	0,99

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	34663	35203	35303
$CV^2 = 0.05$	35807	36416	36519
$CV^2 = 0.1$	37937	38593	38766
$CV^2 = 0.2$	41532	42259	42530
$CV^2 = 0.3$	44229	45000	45283

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	391	392	398
$CV^2 = 0.1$	518	524	533
$CV^2 = 0.2$	625	628	641
$CV^2 = 0.3$	785	792	801

Tabelle 8-17: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung = Anzahl der Transportfahrzeuge für die Steigerung der Prozessdauern von „Verteilen“ um 10%)

Verbesserung-Fall 1

Verbesserung-Fall1 geht davon aus, dass der Produktionsprozess „Lösen&Laden“ beschleunigt werden kann. Analysiert wurde der Verbesserungsfall unter der Annahme, dass:

- die Prozessdauer von „Laden&Lösen“ um 10% reduziert wird.

Die Simulationsergebnisse für den Fall der Push-Steuerung sind in Tabelle 8-18 dargestellt. Die Ergebnisse für die Pull-Steuerung sind in Tabelle 8-19 abgebildet.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2=0$	4051	94	29	10
$CV^2=0.05$	1009	72	27	11
$CV^2=0.1$	3584	98	43	12
$CV^2=0.2$	8079	135	68	13
$CV^2=0.3$	9261	147	79	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	0,57	0,63	0,99
$CV^2=0.05$	0,80	0,82	0,96
$CV^2=0.1$	0,63	0,60	0,98
$CV^2=0.2$	0,50	0,43	0,99
$CV^2=0.3$	0,48	0,41	0,99

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	35278	36146	47129
$CV^2=0.05$	33646	34312	35972
$CV^2=0.1$	36602	37478	48757
$CV^2=0.2$	38749	39702	67305
$CV^2=0.3$	40304	41254	73450

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2=0$	0	0	0
$CV^2=0.05$	993	1076	4007
$CV^2=0.1$	1410	1483	8012
$CV^2=0.2$	681	702	9167
$CV^2=0.3$	525	551	10668

Tabelle 8-18: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Senkung der Prozessdauern von „Laden&Lösen“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	622	64	16	10
$CV^2 = 0.05$	588	68	24	11
$CV^2 = 0.1$	756	72	26	12
$CV^2 = 0.2$	948	79	30	13
$CV^2 = 0.3$	1002	84	33	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,84	0,92	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,84	0,86	0,95
$CV^2 = 0.1$	0,84	0,79	0,98
$CV^2 = 0.2$	0,82	0,71	0,98
$CV^2 = 0.3$	0,82	0,70	0,98

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	31634	32174	32220
$CV^2 = 0.05$	33305	33917	33848
$CV^2 = 0.1$	35156	35818	35875
$CV^2 = 0.2$	38697	39436	39617
$CV^2 = 0.3$	41190	41969	42152

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	260	270	268
$CV^2 = 0.1$	436	439	457
$CV^2 = 0.2$	648	653	667
$CV^2 = 0.3$	731	738	750

Tabelle 8-19: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung= Anzahl der Transportfahrzeuge) für die Senkung der Prozessdauern von „Laden&Lösen“ um 10 %

Deutlich ist zu erkennen, dass die Bildung des Engpasses an Produktionsprozess „Verteilen“ für den Fall der Push-Steuerung verstärkt wird, wodurch sich viele Bestände bzw. Zwischenprodukte innerhalb der Produktionskette ansammeln. Dies führt wiederum zu einer Verstärkung der im Basis-Fall dargestellten Ergebnisse, deren Folge insbesondere lange Fertigstellungszeiten (μ_{ges}) und niedrige Auslastungen sind. Die Ergebnisse der Pull-Steuerung weisen deutlich geringere μ_{ges} -Werte und σ_{ges} -Werte sowie eine deutlich höhere Auslastung auf. Diese Effekte werden bei weiterer Beschleunigung des „Laden&Lösen“-Prozesses verstärkt, weshalb auf die Darstellung weiterer Unterfälle verzichtet wurde.

Verbesserung-Fall 2

Der Verbesserungs-Fall 2 untersucht, welche Auswirkung eine Beschleunigung des „Transportieren“-Prozesses auf die Produktion hat. Der Fall einer:

- 10%-igen Reduktion der Prozessdauer von „Transportieren“ wird hierzu genauer analysiert.

Die Ergebnisse der Push-Steuerung sind Tabelle 8-20 dargestellt.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	390	61	15	10
$CV^2 = 0.05$	2555	86	34	11
$CV^2 = 0.1$	4880	107	48	12
$CV^2 = 0.2$	7572	131	66	13
$CV^2 = 0.3$	7979	139	74	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,90	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,74	0,66	0,98
$CV^2 = 0.1$	0,62	0,51	0,99
$CV^2 = 0.2$	0,55	0,42	0,99
$CV^2 = 0.3$	0,56	0,42	0,99

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30486	30330
$CV^2 = 0.05$	34408	35174	42759
$CV^2 = 0.1$	36854	37755	53647
$CV^2 = 0.2$	38735	39678	65652
$CV^2 = 0.3$	40587	41518	69374

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	1635	1748	6858
$CV^2 = 0.1$	1305	1366	7950
$CV^2 = 0.2$	750	772	9668
$CV^2 = 0.3$	629	658	11765

Tabelle 8-20: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Senkung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	390	61	15	10
$CV^2 = 0.05$	637	67	21	11
$CV^2 = 0.1$	770	72	25	12
$CV^2 = 0.2$	924	79	29	13
$CV^2 = 0.3$	959	84	33	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,90	0,99
$CV^2 = 0.05$	0,92	0,82	0,98
$CV^2 = 0.1$	0,90	0,75	0,98
$CV^2 = 0.2$	0,89	0,68	0,98
$CV^2 = 0.3$	0,89	0,68	0,98

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30486	30330
$CV^2 = 0.05$	33033	33593	33637
$CV^2 = 0.1$	35260	35876	36001
$CV^2 = 0.2$	38759	39443	39656
$CV^2 = 0.3$	41136	41865	42056

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	358	359	379
$CV^2 = 0.1$	497	501	516
$CV^2 = 0.2$	620	623	636
$CV^2 = 0.3$	733	737	760

Tabelle 8-21: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung= Anzahl der Transportfahrzeuge) für die Senkung der Prozessdauern von „Transportieren“ um 10%

Die Reduktion der Prozessdauer von „Transportieren“ führt zu einer Leistungssteigerung. Anhand der obigen Ergebnisse ist deutlich erkennbar, dass bei Umsetzung des Push-Prinzips eine klare Steigerung der μ_{ges} -Werte und somit eine Senkung der Auslastung erfolgt. Bei Anwendung des Pull-Prinzips sind gegenüber dem durch das Pull-Prinzip gesteuerten Basis-Fall kaum Abweichungen bzgl. der Fertigstellung erkennbar.

Verbesserung-Fall 3

Zum Abschluss der Sensitivitätsanalyse wird untersucht, was passiert, wenn der „Verteilen“-Prozess beschleunigt wird. Für die Analyse wird das Szenario:

- Einer 10%-igen Reduktion der Prozessdauer von „Verteilen“ genauer analysiert.

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	414	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	507	69	32	11
$CV^2 = 0.1$	574	71	35	12
$CV^2 = 0.2$	725	76	37	13
$CV^2 = 0.3$	819	82	40	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,89
$CV^2 = 0.05$	0,90	0,85	0,84
$CV^2 = 0.1$	0,91	0,80	0,87
$CV^2 = 0.2$	0,92	0,74	0,90
$CV^2 = 0.3$	0,92	0,73	0,90

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30354
$CV^2 = 0.05$	34003	34617	34448
$CV^2 = 0.1$	35152	35818	35666
$CV^2 = 0.2$	37327	38073	38209
$CV^2 = 0.3$	39724	40518	40889

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	264	272	267
$CV^2 = 0.1$	332	337	333
$CV^2 = 0.2$	412	430	1709
$CV^2 = 0.3$	438	460	2572

Tabelle 8-22: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Push-Prinzip für die Senkung der Prozessdauern von „Verteilen“ um 10%

	μ -DLZ [s]	μ -ZfZ [s]	σ -ZfZ [s]	Anzahl TF
$CV^2 = 0$	414	61	16	10
$CV^2 = 0.05$	507	69	32	11
$CV^2 = 0.1$	575	71	35	12
$CV^2 = 0.2$	665	76	36	13
$CV^2 = 0.3$	703	81	39	13

Auslastung	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0,99	0,99	0,89
$CV^2 = 0.05$	0,90	0,85	0,84
$CV^2 = 0.1$	0,91	0,80	0,87
$CV^2 = 0.2$	0,93	0,75	0,90
$CV^2 = 0.3$	0,93	0,74	0,90

μ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	30000	30540	30354
$CV^2 = 0.05$	34009	34621	34454
$CV^2 = 0.1$	35148	35818	35658
$CV^2 = 0.2$	37332	38076	37934
$CV^2 = 0.3$	39722	40505	40355

σ_{ges}	Prozess 1 [s]	Prozess 2 [s]	Prozess 3 [s]
$CV^2 = 0$	0	0	0
$CV^2 = 0.05$	275	282	280
$CV^2 = 0.1$	332	340	336
$CV^2 = 0.2$	376	389	379
$CV^2 = 0.3$	420	428	422

Tabelle 8-23: Ergebnis der Simulation für eine Steuerung nach dem Pull-Prinzip (CONWIP-Limitierung = Anzahl der Transportfahrzeuge) für die Senkung der Prozessdauern von „Verteilen“ um 10%

Anhand der in Tabelle 8-22 und Tabelle 8-23 dargestellten Ergebnisse wird deutlich, dass das Push-Prinzip zu höheren σ_{ges} -Werte führt. Durch die Reduktion der Prozessdauer von „Verteilen“ wird verhindert, dass „Verteilen“ zum Engpass wird. Der Engpass liegt somit nicht mehr am Ende der Produktionskette und führt somit nicht zu einer Aufstauung von Beständen.

Die Ergebnisse von Verbesserung-Fall 3 weisen sehr deutlich auf, welchen Vorteil es hat, wenn der Systemengpass nicht am Ende der Produktion ist - insbesondere bei einer Push-Steuerung.

Anhang 14 -Verifizierung und Validierung der Simulationen

Verifizierung der Simulationen

Eine Verifikation der Simulationen wurde sowohl anhand von Überprüfungen unterschiedlicher Zwischen- und Endergebnisse als auch durch stichprobenmäßige Plausibilitätsanalysen durchgeführt. Die Software Matlab bietet hierzu auf der einen Seite eine automatische Fehlermeldung, diese erkennt allerdings nur syntaktische Fehler (wie z.B. Fehlermeldungen bei Verwendung falscher Dimensionen oder bei Verwendung nicht definierter Variablen). Auf der anderen Seite kann über die Ausgabe von Zwischenergebnissen und das Durchlaufen isoliert betrachteter Teilmodelle analysiert werden, ob das Programm die gewünschten Abläufe korrekt durchführt. Als besonders geeignet hat sich hierbei die Ausgabe von zusätzlichen Zwischenergebnissen herausgestellt.

Bei den ebenfalls mathematisch beschriebenen Modellen aus Kapitel 5.3 fand zudem ein Abgleich zwischen mathematischer Modellierung und der Simulation statt.

Validierung der Pull-Steuerung für Leerfahrten

Eine Validierung überprüft, ob das abgebildete Modell (hier: Simulationsmodell des Bagger -LKW-Betriebs) die Realität hinreichend genau abbildet. Hierzu ist es erforderlich, die Ergebnisse der Simulation mit real gemessenen Werten (des abgebildeten Bagger-LKW-Betriebes) zu vergleichen. Das Ziel ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des abgebildeten Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele hinreichend genau wiedergibt.

Ein wesentliches Problem in diesem Zusammenhang ist, dass das Untersuchungsziel, der Nachweis der Vorteilhaftigkeit einer an dem Pull-Prinzip orientierten Steuerung, aufgrund des hohen Aufwands nicht direkt an einem realen System untersucht werden konnte. Aus diesem Grund wird der ursprüngliche Systemzustand einer realen Erdbaustelle bzgl. des Bagger-LKW-Betriebs in einem Simulationsmodell nachgebildet. Dieses Simulationsmodell kann anhand real aufgenommener Messwerte validiert werden. Anschließend wird das ursprüngliche System bzgl. der LKW-Steuerung verändert (d.h. das Modell bleibt grundsätzlich identisch, allerdings werden die LKW mit einer an dem Pull-Prinzip orientierten Steuerung zugewiesen). Die Analyse der Vorteilhaftigkeit findet anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse des ursprünglichen Systemzustandes mit dem um die LKW-Steuerung veränderten Systems statt.

In diesem Abschnitt wird die Validierung der Simulation des ursprünglichen Zustands erläutert. Die Validierung erfolgt anhand von während Baustellenbeobachtungen aufgenommen Zwischenankunftszeiten von LKW. Hierzu werden die simulierten Zwischenankunftszeiten den real gemessenen Werten gegenübergestellt.

Zur Beurteilung wird der Erwartungswert der real gemessenen Zwischenankunftszeiten mit dem Erwartungswert aller simulierten Zwischenankunftszeiten verglichen. Des Weiteren wird die Standardabweichung des Erwartungswerts der simulierten Zwischenankunftszeiten je Simulationsdurchgang analysiert, um beurteilen zu können, wie stark die simulierten Zwischenankunftszeiten je Simulationsdurchlauf von den real gemessenen Werten abweichen.

Zur Berücksichtigung der Einschwingphase des Systems wurden die ersten⁴⁰¹ simulierten Werte der Zwischenankunftszeiten für jede Simulation bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Der Erwartungswert wird wie folgt bestimmt:

$$EWZAZ_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} ZAZ_{jik}}{n_{ij}}$$

$EWZAZ_{ji}$ Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten des Simulationsdurchlaufs i für Linie j
 ZAZ_{jik} Zwischenankunftszeit k des Simulationsdurchlaufs i für Linie j
 n_{ji} Anzahl der simulierten Zwischenankunftszeiten des Simulationsdurchlaufs i für Linie j

$$EWZAZ_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} EWZAZ_{ji}}{n_s}$$

$EWZAZ_j$ Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten aller Simulationsdurchläufe für Linie j
 n_s Anzahl der Simulationsdurchläufe

Der Erwartungswert der real gemessenen Zwischenankunftszeiten für Linie 1 beträgt 145,72 [s], der Erwartungswert aller simulierten Zwischenankunftszeiten für Linie 1 beträgt 140,14 [s]. Hieraus folgt eine Differenz von ca. -3,8 %, d.h. im Mittel weichen die Erwartungswerte der simulierten Zwischenankunftszeiten für Linie 1 mit -3,8% ab. Diese Genauigkeit wird als ausreichend genau angenommen.

Für Linie 2 ergibt sich eine real gemessene Zwischenankunftszeiten von 130 [s], der Erwartungswert aller simulierten Zwischenankunftszeiten beträgt 129,48 [s] und weicht damit deutlich geringer ab als bei Linie 1.

Die Standardabweichung der Erwartungswerte der Zwischenankunftszeiten je Simulationsdurchlauf berechnet sich zu:

$$STD_{EWZAZ_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (EWZAZ_{ji} - EWZAZ_j)^2}{n_s - 1}}$$

STD_{EWZAZ_j} Standardabweichung der Erwartungswerte der Zwischenankunftszeiten für Linie j

Die Standardabweichung der Erwartungswerte der Zwischenankunftszeiten betrug für Linie 1 1,68 [s] und für Linie 2 1,64 [s]. Hieraus lässt sich folgern, dass die simulierten Zwischenankunftszeiten bezüglich ihres Erwartungswerts je Simulationsdurchlauf nicht zu stark schwanken und damit sehr gut die Realität wiedergeben.

Zur weiteren Analyse wurde untersucht, wie stark die simulierten Zwischenankunftszeiten bezüglich ihrer Streuung um den Erwartungswert mit den real durchgeführten Messungen übereinstimmen.

Hierzu wurde zunächst die Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten je Simulationsdurchgang wie folgt berechnet:

⁴⁰¹ Konkreter wurde angenommen, dass das System eingeschwungen ist, sobald jeder LKW von Linie 1 den Aufnahmepunkt 3mal passiert hat. D.h. bei 9 eingesetzten LKW werden die ersten 27 Werte bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Datenaufnahmen an einem eingeschwungenen System erfolgt sind.

$$STDZAZ_{ji} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (GEM_EWZAZ_j - ZAZ_{jik})^2}{n_{ji}^{402}}}$$

$STDZAZ_{ji}$ *Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten je Simulationsdurchgang i für Linie j*
 GEM_EWZAZ_j *Gemessener Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten für Linie j*

$STDZAZ_{ji}$ ist ein Parameter, der die Streuung der simulierten Zwischenankunftszeiten um den real gemessenen Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten der Linie j des jeweiligen Simulationsdurchlaufs quantifiziert. Somit kann beurteilt werden, ob die simulierten Zwischenankunftszeiten eine ähnliche Streuung aufweisen wie die real gemessenen.

Eine Beurteilung der Abbildung der Schwankungen erfolgt an der Bestimmung des Erwartungswerts der Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten eines Simulationsdurchgangs und anhand der Standardabweichung der Standardabweichungen der simulierten Zwischenankunftszeiten aller Simulationsdurchgänge.

Diese werden wie folgt bestimmt:

$$EW_{STDZAZ_j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} STDZAZ_{ji}}{n_s}$$

EW_{STDZAZ_j} *Erwartungswert der Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten bei bekanntem Erwartungswert GEM_EWZAZ_j für Linie j*

$$STD_{STDZAZ_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (EW_{STDZAZ_j} - STDZAZ_{ji})^2}{n_s}}$$

STD_{STDZAZ_j} *Standardabweichung der Standardabweichungen der simulierten Zwischenankunftszeiten aller Simulationsdurchgänge für Linie j*

Der simulierte Wert EW_{STDZAZ_j} ergab für Linie 1 149,2 [s] und für Linie 2 163,3 [s]. Vergleicht man diese Ergebnisse mit der Standardabweichung der real aufgenommen Daten (Linie 1 140,8 [s]) und Linie 2 176,6 [s]), so stellt man eine Abweichung von 6% für Linie 1 bzw. -7,5% für Linie 2 fest. Hieraus lässt sich eine ausreichende Genauigkeit bezüglich des Erwartungswerts der simulierten Standardabweichungen der Zwischenankunftszeiten pro Simulationsdurchlauf feststellen.

Der simulierte Wert STD_{STDZAZ_j} ergab für Linie 1 8,4 [s] und für Linie 2 9,6 [s]. Hieraus lässt sich feststellen, dass die simulierten Zwischenankunftszeiten pro Simulationsdurchgang bezüglich ihrer Standardabweichung nicht zu stark schwanken.

Als zusätzlicher Validierungswert dient die Auslastung der Bagger. Die Ergebnisse der Simulation bzgl. der Wartezeiten der Bagger werden mit den real aufgenommen Auslastungen verglichen. Die aus der Simulation resultierenden Auslastungen können leicht durch:

$$\rho_{B_i} = \frac{T_s - WB_i}{T_s}$$

⁴⁰² Der Erwartungswert ist bekannt, daher nicht „n-1“

ρ_{Bi}	Auslastung des Bagger i[-]
T_S	Simulationsdauer [s]
WB_i	kumulierte Wartezeit ⁴⁰³ des Bagger i [s]

bestimmt werden.

Der Mittelwert der simulierten Auslastung von Bagger 1 betrug bei 500 exemplarisch durchgeführten Simulationsdurchläufen 67,2 % (der Vergleichsdatensatz von Baustellenbeobachtungen ergaben eine Auslastung von 61,7%). Diese entspricht einer Überschätzung der Auslastung um 8,9 %. Bei diesem Vergleich ist anzumerken, dass die 61,7 % auf Basis der Häufigkeiten der LKW-Anzahl bei Bagger 1 bestimmt wurden. Hierzu wurde die LKW-Anzahl jeweils am Ende einer Minute bestimmt. Daher ist dieser Vergleichswert nicht exakt. Hieraus folgt, dass davon ausgegangen werden kann, dass 67,1 % ein sehr gutes Ergebnis ist und, dass dies erneut dafür spricht, dass die Simulation die Realität sehr gut abbildet.

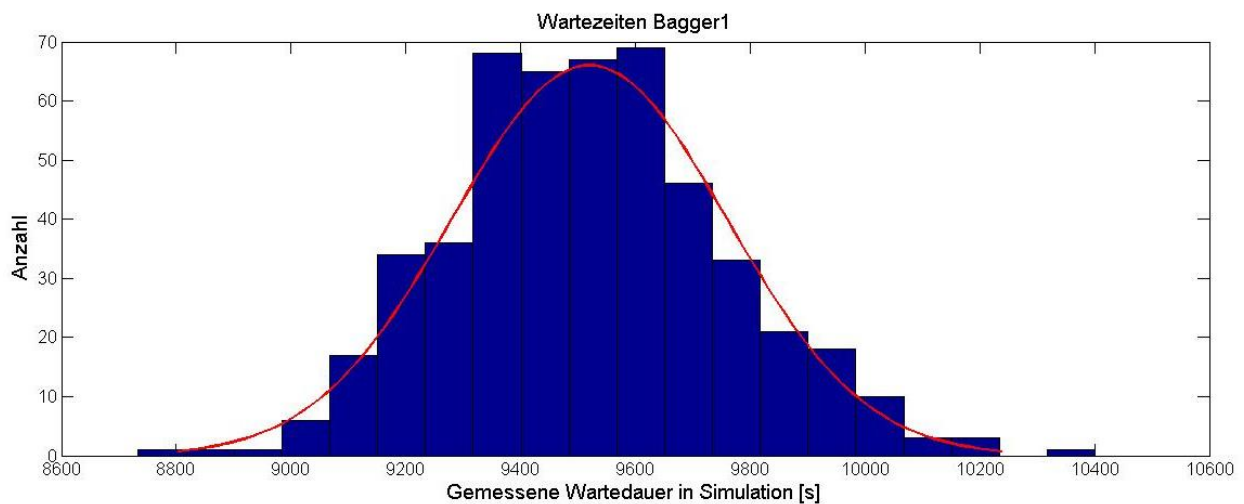


Abbildung 8-33: Simulierte Wartedauern des Baggers von Linie 1

Der Mittelwert der simulierten Auslastung von Bagger 2 betrug bei 500 exemplarisch durchgeführten Simulationsdurchläufen 60,7% (der Vergleichsdatensatz von Baustellenbeobachtungen ergaben eine Auslastung von 55 %). Die Abweichungen zwischen Simulation und realem Datensatz lassen sich einerseits darauf zurückführen, dass die Aufzeichnungen des Baggers und die der LKW aufgrund der Entfernung zwischen den Aufnahmeorten nicht zum gleichen Zeitpunkt stattfinden konnten (aufgrund identischer Bedingungen ist der Datensatz jedoch repräsentativ⁴⁰⁴). Zum anderen wurde in der Simulation unterstellt, dass die Positionierzeit⁴⁰⁵ der LKW der ersten Spielbewegungsdauer des Baggers entspricht. Bei den Messungen wurde hierbei jedoch unterschieden und nur der produktive Anteil mit einbezogen. Daher kann auch aus Sicht des Vergleichs der simulierten und tatsächlich vorgefundenen Auslastung von Bagger 2 davon ausgegangen werden, dass die Simulation die Realität sehr gut abbildet.

⁴⁰³ Konkreter handelt es sich um den Erwartungswert der Wartezeit.

⁴⁰⁴ Die Messungen fanden unter identischen Bedingungen direkt hintereinander statt.

⁴⁰⁵ Hierunter ist diejenige Zeit zu verstehen, die ein LKW benötigt, um sich gegenüber dem Bagger auszurichten.

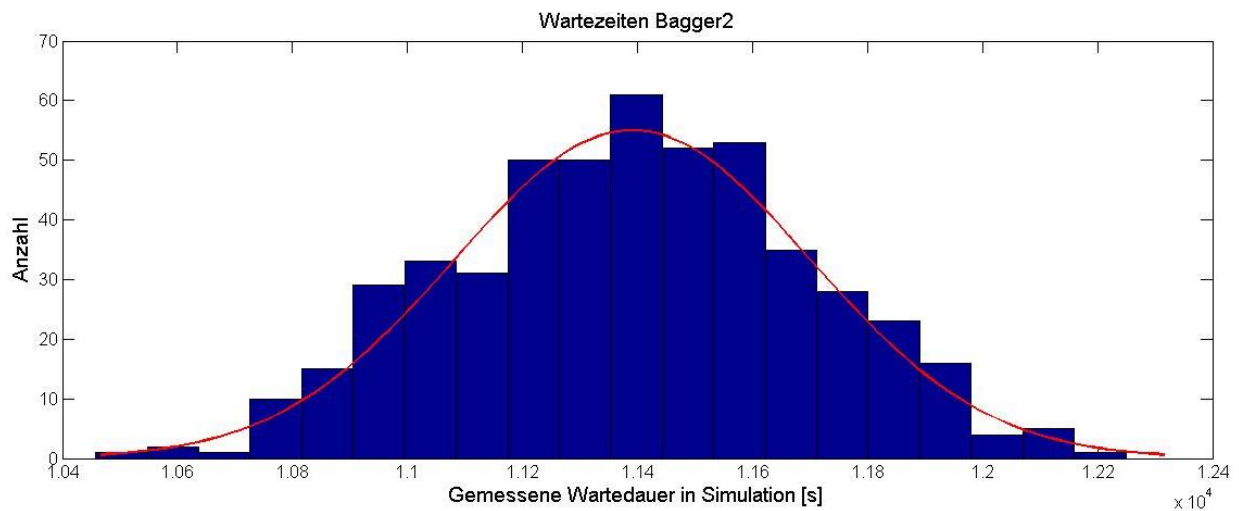


Abbildung 8-34: Simulierte Wartedauern des Baggers von Linie 2

Die durchgeführte Validierung deutet insgesamt somit darauf hin, dass das Simulationsmodell sehr gut geeignet ist, um die Realität zu simulieren.

Bezüglich der simulierten Wartedauern der Bagger ist des Weiteren festzustellen, dass die Standardabweichung der Wartedauern nicht zu stark schwanken (vgl. Abbildung 8-33 und Abbildung 8-34). Dies ist ein weiterer Punkt, der für eine erfolgreiche Validierung spricht.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein wesentliches Problem der hier durchgeführten Validierung die real gemessene Stichprobenmenge ist. Das Ziel der Simulation ist einen Arbeitstag zu simulieren, hierzu wurde ein Stichprobenumfang von ca. 1 Stunde gemessen, was ca. 12,5 % der simulierten Grundgesamtheit entspricht. Aufgrund der Tatsache, dass häufig täglich, allerdings auch teilweise in deutlich kürzeren Zyklen, auf realen Baustellen Systemanpassungen durchgeführt werden und viele Störfaktoren auf die Baustelle einwirken (z.B. Witterung, Behinderungen durch das Verkehrsaufkommen auf öffentlichen Verkehrswegen) hat es sich als äußerst schwierig ergeben, valide Vergleichsdaten zu generieren⁴⁰⁶.

⁴⁰⁶ So wurde an mehreren Tagen gemessen jedoch wurden stets Systemänderungen vorgenommen (Änderung der Baustraßen oder Reallokation der LKW bzw. Bagger), was die Datenaufnahme stark erschwert hat. Besonders anschaulich war auch ein Ereignis des Witterungsumschwungs von bewölkt auf regnerisch (intensiver 15 minütiger Regenschauer), was in sehr kurzer Zeit zum kompletten Erliegen der Baustelle geführt hat.