

Lehrstuhl für
Unternehmenslogistik
Prof. Dr. M. Henke

| Fakultät Maschinenbau

| Technische Universität Dortmund

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

**Losgrößenbetrachtungen im Prozesskettenparadigma -
Methodik zur Berechnung der Losgröße auf Prozessebene**

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Peters

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Axel Kuhn

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. 房殿军 Dianjun Fang

Kurzfassung

Traditionell konzentriert sich die Losgrößenberechnung auf einen Produktionsschritt. Bis heute basieren die meisten Methoden der Losgrößenoptimierung auf diesem Prinzip. Dies widerspricht jedoch einer modernen, prozessorientierten Geschäftsstrategie. Um den Anforderungen der zunehmenden Individualisierung der Märkte gerecht zu werden, hat in den letzten Jahrzehnten ein Umdenken bei der Leitung produzierender Unternehmen stattgefunden. Die Optimierung klassischer Zielgrößen wie Zeit, Kosten und Qualität wird von den Kunden als selbstverständlich vorausgesetzt. Individuelle Produkte zu optimierten Zielgrößen bereitzustellen, stellt Unternehmen vor neue Herausforderungen. Im Zuge der Industrie 4.0 werden die Unternehmensstrukturen diesbezüglich verbessert. Vernetzten, dezentralen und autonomen Wertschöpfungsketten wird ein großes Potenzial zugeschrieben, auf die neuen Marktanforderungen zu reagieren und damit Wettbewerbsvorteile zu erreichen.

In dieser Arbeit wird die Möglichkeit der prozessbezogenen Losgrößenoptimierung unter den durch Industrie 4.0 entstehenden Anforderungen erforscht. Dies wirft zunächst die Frage nach relevanten Variablen und Kriterien der Losgrößenoptimierung auf. Bestehende theoretische Konzepte konzentrieren sich weiterhin meist auf die Optimierung von Lager- und Rüstkosten, weil die Modellierung auf einen sehr kleinen Betrachtungsbereich ausgelegt ist. Praxisorientierte Ansätze betrachten zusätzlich die Minimierung von Überproduktion als wichtiges Ziel einer Losgrößenentscheidung. Die hier vorgelegte Analyse zeigt jedoch, dass Überproduktion nicht die allein entscheidende Art von Verschwendung innerhalb einer Prozesskette ist. Das Warten zwischen den Prozessschritten stellt bezogen auf eine Prozesskette ein bedeutenderes Risiko dar. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse darauf hin, dass keines der etablierten Verfahren geeignet ist, eine Losgröße für alle verschiedenen Prozesse einer Supply Chain zu berechnen. Losgrößenentscheidungen, die den übergreifenden Bereich einer Prozesskette optimieren, erfordern vielmehr eine umfassende Betrachtungsweise weg von der alleinigen Sicht auf Produktionsprozessen. Dazu werden die drei Säulen der Losgrößenoptimierung *Kostenoptimierung*, *Modellierung* und *Flexibilität* erarbeitet.

Auf dieser Basis wird ein Verfahren ermittelt, das nicht nur auf Produktionsprozesse fokussiert, sondern vielseitig einsetzbar ist, aber dennoch die erwähnten Faktoren in die Losgrößenoptimierung einbezieht und mit einer umfassenden Modellierung dazu beiträgt, kundenindividuelle Produkte innerhalb kürzester Zeit anzubieten. Das übergeordnete Ziel dabei ist es, den Fokus der Losgrößenoptimierung von einzelnen, auf einen Bereich begrenzten Schritten oder Abschnitten umzuleiten zu einem Gesamtoptimum entlang der gesamten Prozesskette. Dazu bedient sich die Losgrößenoptimierung sowohl der Sicht auf den einzelnen Prozess, als auch der Perspektive auf die Prozessabfolge in der Wertschöpfungskette.

Abstract

Historically, lot size optimization has concentrated on just one production unit. Until today most methods used are based on this principle. However, this contradicts a modern, process-oriented business strategy. Lean management already provides practical solutions to determine lot sizes. But these generally do not take cost minimization into account and usually focus on one part of rather than the entire supply chain. Thus a process-oriented strategy to optimize lot sizes needs yet to be developed.

In this thesis, the possibility of process-related lot size optimization is explored under requirements of today's modern industry and its demand for highly individualized products. This approach requires a general change of thinking regarding lot size optimization. For example it raises the basic question by which main criteria a lot size optimization should be performed. In a first step, existing theoretical concepts and lot-sizing procedures are analyzed and compared. They continue to focus mostly on the optimization of storage and set-up costs, because the modeling is designed to concentrate on a rather small section.

Practical approaches in addition consider the minimization of overproduction as a major objective of a lot-sizing decision. However, the analysis presented here shows that overproduction is not the only decisive type of waste within a process chain. Waiting in between the process steps for instance can, based on the process chain in question, be an even more significant risk. In addition, the results indicate that none of the established methods is suitable to calculate a lot size for all the different processes of a supply chain. Lot-sizing decisions that optimize the entire process chain require a much more comprehensive approach and do offer greater versatility in return. They also make it necessary to define different process-specific factors. For this purpose, the three pillars of lot size optimization, cost optimization, modeling and flexibility, are developed.

On this basis, a method is developed, which focuses not only on production processes, but is very versatile and takes the afore-mentioned factors involved in lot-sizing optimization into consideration. Thanks to its comprehensive modeling it is capable to provide customized products in a comparatively short time. Furthermore, the scope for which a lot size should be calculated is investigated. The overall aim is to redirect the focus of lot-size optimization from single process steps or sections towards an overall total optimum along the entire process chain. To this end, this thesis applies both: the view on the individual process, as well as on the process sequence in the supply chain.

Inhaltsverzeichnis

Losgrößenbetrachtungen im Prozesskettenparadigma

Methodik zur Berechnung der Losgröße auf Prozessebene

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2 Methodik und Gliederung der Arbeit	3
2 Modelle und Verfahren zur Ermittlung optimaler Losgrößen	7
2.1 Einproduktmodelle	8
2.1.1 Economic Order Quantity Model (EOQ-Modell)	8
2.1.2 Economic Production Lot (EPL-Modell)	10
2.1.3 Single-Level Uncapacitated Lot Sizing Problem (SLULSP)	12
2.2 Mehrproduktmodelle	14
2.2.1 Economic Lot Sizing and Scheduling Problem (ELSP).....	14
2.2.2 Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP).....	17
2.2.3 Continuous Setup Lot Sizing Problem (CSLP)	19
2.2.4 Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem (DLSP)	20
2.2.5 General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP).....	20
2.2.6 Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem (MLCLSP)	21
2.3 Weitere Modelle	23
2.4 Auswertung und Zusammenfassung	23
3 Prozessorientierung	29
3.1 Grundlagen	29
3.2 Prozessmanagement	31
3.3 Lean Management	34
3.4 Auswirkungen der Prozessorientierung auf Losgrößenentscheidungen	37
3.4.1 One Piece Flow	37

3.4.2	Kanban Steuerung	39
3.4.3	Every Part Every Interval (EPEI).....	43
3.4.4	Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung	45
3.4.5	Weitere Verfahren	46
3.5	Auswertung und Zusammenfassung	47
4	Losgrößenermittlung auf Prozessebene.....	50
4.1	Prozessorientierte Modellierungsverfahren als Basis für die Losgrößenoptimierung	50
4.1.1	Wertstrommethode	51
4.1.2	Dortmunder Prozessketteninstrumentarium	54
4.1.3	Verfahrensvergleich und Auswahl	59
4.2	Flexibilität als Kriterium zur Losgrößenoptimierung	61
4.2.1	Flexibilität – Mittel zum Zweck oder eigenständige Zielgröße?.....	63
4.2.2	EPEI zur Losgrößenberechnung.....	65
4.3	Kostenoptimierung als Kriterium zur Losgrößenermittlung.....	67
4.3.1	Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung.....	70
4.3.2	Prozesskostenrechnung in LogiChain ³	76
4.3.3	Indirekte Kostenoptimierung durch Verschwendungsvermeidung....	80
4.4	Das Primat der Rüstkostenminimierung über die Flexibilität unter Verwendung der Kundennachfrage.....	82
4.4.1	Entwicklung eines Nivellierungsfaktors zur Losgrößenermittlung....	83
4.4.2	Diskussion der Ergebnisse des Nivellierungsfaktors	85
4.4.3	Modellierung der Prozesskette	89
4.4.4	Flexibilität durch Losgrößenoptimierung.....	95
4.4.5	Kostensenkung durch Losgrößenoptimierung.....	96
5	Praxisbezogene Anwendung der Losgrößenbildung auf Prozessebene.....	98
5.1	Beispiel aus der Massenfertigung	101
5.2	Anwendung in einer Serienproduktion	108
6	Zusammenfassung und Ausblick	114
7	Literaturverzeichnis	117
8	Anhang.....	I
8.1	Prozessketten der Praxisbeispiele.....	I
8.2	Ergänzendes Material	III

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EPEI	Every Part Every Interval
ERP	Enterprise Resource Planning
ET AL.	et alii (lateinisch „und andere“)
FFZ	Flurförderzeug
FIFO	First In First Out
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
IFRS	International Financial Reporting Standards
IMVP	International Motor Vehicle Program
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
KLТ	Kleinladungsträger
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MDE	Mobile Datenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
N.N.	nomen nescio (lateinisch „Name unbekannt“)
o.O.	ohne Ort
PFEP	Plan for every Part
PKI	Dortmunder Prozessketteninstrumentarium
PKR	Prozesskostenrechnung
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
PPU	Part-Prepackaging Unit
SPU	Single-Packaging Unit
TPS	Toyota Production System
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
ZfB	Zeitschrift für Betriebswirtschaft

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2-1: Lagerbestandsverlauf im EOQ-Modell [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.77].	9
Abbildung 2-2: Reduktion der maximalen Lagermenge im EPL-Modell [TAFT 1918, S.1410].....	11
Abbildung 2-3: Lagerbestandsverlauf im EPL-Modell [REITNER 2007, S.9]	11
Abbildung 2-4: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 1/3	24
Abbildung 2-5: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 2/3	26
Abbildung 2-6: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 3/3	27
Abbildung 3-1: Zwei-Karten Kanban-System mit Produktionssupermarkt [ROTHER & SHOOK 2006, S.42]	39
Abbildung 3-2: EPEI-Berechnung (Schematisch) [ERLACH 2010, S.73].....	44
Abbildung 3-3: Kapitalbindung im Auftragsdurchlauf und deren Berücksichtigung bei der durchlauforientierten Losgrößenermittlung [NYHUIS 1991, S.62, 104]45	
Abbildung 3-4: Auswirkungen prozessorientierter Strukturen auf die Parameter und Funktionen im klassischen Losgrößenmodell	48
Abbildung 4-1: Bausteine zur Ermittlung des Ist- Zustands im Wertstromdesign [ROTHER & SHOOK 2003, S.14 ff.]	52
Abbildung 4-2: Exemplarischer Ist-Zustand beim Wertstromdesign [ROTHER & SHOOK 2006, S.26 f.]	52
Abbildung 4-3: Prozesskettenplan mit Untermodell [KUHN 2008, S.218].....	56
Abbildung 4-4: Symbole des Prozessketteninstrumentariums [KUHN 1995, S.46 ff]....	56
Abbildung 4-5: Potenzialklassen des Prozesskettenelements [KUHN 2008, S.223]	57
Abbildung 4-6: Vergleich der Wertstrommethode mit dem Prozesskettenparadigma [FUNK 2014, S.39]	60
Abbildung 4-7: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Ressourcenauslastung [WESTKÄMPER & ZAHN 2009, S.18; FUCHS 2005, S.63 f.]	71
Abbildung 4-8: Die sieben Arten der Verschwendung bezogen auf Losgrößenentscheidungen in unterschiedlichen Prozessen.....	81
Abbildung 4-9: Methodik zur Losgrößenoptimierung auf Prozessebene.....	83
Abbildung 4-10: Abhängigkeit des Nivellierungsfaktors von der Produktwechselzeit .	88
Abbildung 4-11: Modellbausteine des Dortmunder Prozessketteninstrumentariums [WINZ & QUINDT 1997, S.54].....	90
Abbildung 4-12: Verknüpfungstypen im Dortmunder Prozessketteninstrumentarium [WINZ & QUINDT 1997, S.56].....	92
Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Fabrik- und Prozessplanung auf Basis des PFEP-Ansatzes [PETERS ET AL. 2014, S.39]	100

Abbildung 5-2: Verbindung aus Layout- und Materialflussplanung (Beispiel 1).....	105
Abbildung 5-3: Vereinfachte Teilprozesskette (Beispiel 1)	106
Abbildung 5-4: Parameter zur Losgrößenberechnung (Beispiel 1)	107
Abbildung 5-5: Kombination aus Layout- und Materialflussplanung (Beispiel 2).....	110
Abbildung 5-6: Vereinfachte Teilprozesskette (Beispiel 2)	111
Abbildung 5-7: Parameter zur Losgrößenberechnung (Beispiel 2)	112

Symbolverzeichnis

#K	Anzahl der Kanban-Karten im Steuerungskreis
#R	Anzahl der Ressourcen
#T	Anzahl der Gleichteile pro Produkt
AZd	Tägliche Arbeitszeit
BK	Bereitschaftskosten
BZ	Bearbeitungszeit des vorgelagerten Prozesses [ZE]
c	Produktionsgeschwindigkeit [ME/ZE]
ConWiP	Bestandsobergrenze [Stk.]
d (t)	Bedarf zum Zeitpunkt t [ME]
GE	Geldeinheit
GM	Gebindemenge beim Transport [Stk.]
K	Gesamtkosten [GE]
kL	Lagerkosten [GE/(ME*ZE)]
kP	Produktionskosten [GE/ME]
kR	Rüstkosten [GE]
KT	Kundentakt [ZE]
ME	Mengeneinheit
n	Anzahl betrachteter Produkte
P	Summe aller Teilprozesse
q	Losgröße [ME]
R	Ressourcenindex
RA	Ressourcenangebot
RB	Ressourcenbedarf
RS	Reichweite des Supermarkts
t	Zeit [ZE] oder Zeitperiode
tB	Bearbeitungszeit [ZE]
tR	Rüstzeit [ZE]
TZ	Transportzeit [ZE]
V	Verfügbarkeit
X	Teilprozess
x (t)	Produktionsmenge zum Zeitpunkt t [ME]
y (t)	Lagerbestand zum Zeitpunkt t [ME]
yTag	Bedarfsmenge pro Tag
ZE	Zeiteinheit

Weitere Symbole werden direkt im Text erläutert.

1 Einleitung

Die „Zukunftsfabrik“, in welcher Produktions- und Informationstechnik miteinander verschmelzen, ist momentan sowohl in der Forschung als auch in den Medien allgegenwärtig. Unter dem Titel *Industrie 4.0* werden die Bestrebungen zu mehr Vernetztheit, Dezentralität und Autonomie zusammengefasst, von denen die revolutionäre Verbesserung der Produktionstechnologien erwartet wird. [HARTBRICH 2014, S.1] Der Begriff *Industrie 4.0* steht für die vierte Revolution der industriellen Produktion, an deren Schwelle sich die deutsche Wirtschaft derzeit befindet [TEN HOMPEL & HENKE 2014, S.623].

Mit der Erfindung der Dampfmaschine im 18. Jahrhundert wurden in der darauffolgenden ersten industriellen Revolution mechanische Produktionsanlagen wie Pumpen, Webstühle und Dampfhämmer entwickelt und dadurch die Arbeit der Menschen wesentlich erleichtert. Die zweite industrielle Revolution fand Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts statt. Der zunehmende Einsatz elektrischer Energie gepaart mit Arbeitsteilung und Arbeitsorganisation entlang eines Fließbandes erhöhte die Ausbringungsmengen enorm. Die Weichen zur kosteneffizienten Massenproduktion waren gestellt. Doch die neuen Möglichkeiten warfen auch Probleme auf. Ein flexibler Umgang mit der Kundennachfrage war kaum möglich. HENRY FORD brachte es wie folgt auf den Punkt: „Jeder Kunde kann seinen Wagen beliebig anstreichen lassen, wenn der Wagen nur schwarz ist“ [FORD & CROWTHER 1922, S.72]. Der verstärkte Einsatz von Informationstechnologie ermöglicht eine bessere Kommunikation zwischen Kunden und Unternehmen. Dieser noch andauernde Prozess wird als dritte industrielle Revolution bezeichnet.

Informationsaustausch ist auch die Grundlage der sogenannten vierten Revolution. Sie führt die Erkenntnisse der dritten industriellen Revolution einen Schritt weiter und „bringt autonome, selbststeuernde und wissensbasierte Produktionssysteme“ [SCHLICK & STEPHAN 2012, S.1]. Dazu hat die deutsche Bundesregierung ein Förderprogramm mit dem Titel *Industrie 4.0* gestartet, durch das die Mensch-Maschine-Interaktion, Vernetztheit und Autonomie in industriellen Anwendungen gestärkt werden, und gleichzeitig die unternehmensübergreifende Produktionslogistik verbessert werden soll. Dabei spielen Automatisierung in der Industrie und die Entwicklung intelligenterer Monitoring- und autonomer Entscheidungsprozesse eine wesentliche Rolle, um Unternehmen und ganze Wertschöpfungsnetzwerke nahezu in Echtzeit steuern und optimieren zu können. [BMBF 2014, S.1 f.]

Während FORD trotz mangelnder Flexibilität keine Probleme hatte, seine Produkte zu verkaufen, sehen sich Unternehmen heutzutage gerade durch die industriellen Revolutionen mit anderen Marktbedingungen konfrontiert: Kunden wünschen sich

individuelle Produkte zu möglichst geringen Kosten. Daraus entsteht die Notwendigkeit, eine Vielzahl von Produkten und Produktvarianten in kostengünstigen Stückzahlen zu fertigen.

Um die technologiegetriebenen Entwicklungen der *Industrie 4.0* zielgerichtet voran zu bringen und einzusetzen, müssen sie mit Managementstrategien ergänzt und um strategische, taktische und operative, *organisatorische* Herangehensweisen erweitert werden. TEN HOMPEL & HENKE sehen für die *Planung 4.0* eine „Regelung des Materialflusses an vielen, um nicht zu sagen an jeder Stelle“ als erforderlich an und legen die „Trennung von normativer und operativer Entscheidungsebene“ dar [TEN HOMPEL & HENKE 2014, S.617]. Diese Notwendigkeit ist insbesondere durch die Erfahrungen aus der Finanzkrise im Jahr 2009 sowie der sich anschließenden wirtschaftlichen Erholung der letzten Jahre deutlich geworden. Flexibilität und effizienter Einsatz von Ressourcen spielen daher heute mehr denn je eine zentrale Rolle im Management von Wertschöpfungsketten. In der Praxis hat der Ansatz des Lean Managements deswegen stark an Bedeutung gewonnen. Ziel einer verschwendungsarmen und prozessorientierten Unternehmensplanung ist es daher, die Abläufe der Wertschöpfungskette optimal aufeinander abzustimmen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund dezentraler, autonomer und vernetzter Strukturen, wie sie durch *Industrie 4.0* geschaffen werden, wird in dieser Arbeit der organisatorische Aspekt der Losgrößenbildung und -optimierung untersucht. „Sobald die Dinge anfangen, sich zu bewegen, ist die Logistik gefragt. Die Dinge und Informationen im Fluss zu halten, könnte als erstes Axiom der Logistik postuliert werden. Mit dem *Internet der Dinge* tritt die Logistik in eine völlige neue Dimension ein. Material- und Informationsfluss werden eins“ [BULLINGER & TEN HOMPEL 2007, S.29]. Eine Losgrößenoptimierung erscheint unter diesen Gesichtspunkten ein geeignetes Mittel zur Unterstützung dieser Bestrebungen und zur Einhaltung des ersten Axioms der Logistik zu sein. Die Frage nach der „optimalen Losgröße“ ist eine der ältesten betriebswirtschaftlichen Fragestellungen. Ursprünglich stellte die Ermittlung der optimalen Losgröße das Optimierungsproblem von Lager- und Rüstkosten dar. Ford Whitman Harris entwickelte ein entsprechendes Modell im Jahre 1913.¹

Doch bislang besteht eine Lücke zwischen den gängigen Losgrößenverfahren und den in der Praxis verwendeten Produktionsmanagementstrategien. Traditionell handelt es sich um eine Optimierung der Rüstkosten- und der Lagerkostenfunktion, was insbesondere die Probleme hoher Bestände und geringer Flexibilität mit sich bringt.

¹FORD W. HARRIS formuliert das Modell in seiner Veröffentlichung „How many Parts to make at once“, aus dem Jahre 1913, siehe dazu Kapitel 2.1.1.

Lean Management liefert ebenfalls Ansätze zur Losgrößenoptimierung und legt hierfür die Prozessflexibilität als Hauptkriterium zur Losgrößenoptimierung an. Eine Kostenbetrachtung fehlt dabei jedoch.

In dieser Arbeit sollen bestehende Verfahren der Losgrößenermittlung mit der Prozesssicht verbunden werden, da singuläre Optimierungen einem ganzheitlichen Optimum und somit dem Prozessgedanken diametral gegenüberstehen. Dies erscheint allein schon aufgrund der prozessorientierten Kostenbetrachtung eine sinnvolle Erweiterung der klassischen Losgrößenmodelle zu sein. Somit werden fixe Kostenoptimierungen überwunden und um eine prozessorientierte Betrachtung erweitert. Diese prozessorientierte Vorgehensweise geht direkt mit der Dezentralität, Vernetztheit und Autonomie als den drei Hauptbestandteilen von *Industrie 4.0* einher, weshalb diese ebenfalls als Kriterien zur Losgrößenoptimierung dienen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das eine Supply Chain übergreifende Losgrößenoptimierung erlaubt. Dazu ist es erforderlich, Losgrößen für unterschiedliche Prozesse einer Prozesskette zu bestimmen. Keineswegs reicht es aus, Losgrößenoptimierungen nur für Produktionsprozesse durchzuführen. Die Betrachtungsweise muss auf andere Prozesse ausgeweitet werden. Diese müssen aufeinander abgestimmt werden, um den Fokus der Losgrößenoptimierung von einzelnen, lokalen Schritten oder Teilbereichen weg, hin zu einem Gesamtoptimum entlang der gesamten Prozesskette zu richten. Dabei wird die Stärke des Dortmunder Prozesskettenparadigmas ausgenutzt, Optimierungspotenziale an Schnittstellen und über funktionale Zuständigkeitsbereiche hinweg zu erschließen. Außerdem werden damit eine angemessene Bestandsdimensionierung, geringere Durchlaufzeiten, die Ausrichtung der Losgröße auf den Kunden, sowie Wirtschaftlichkeit und Flexibilität angestrebt. So werden unternehmensübergreifende Supply Chains betrachtet und auf diese Weise der Einfluss von Losgrößenverfahren auf den Gesamtprozess und damit auf den Kundennutzen bewertet.

1.2 Methodik und Gliederung der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit spiegelt im Wesentlichen die induktive Vorgehensweise, die bei der Entwicklung des Verfahrens zur Losgrößenoptimierung entlang einer Prozesskette genutzt wurde. Zunächst werden bestehende Modelle und Verfahren zur Losgrößenoptimierung vorgestellt und im Rahmen einer qualitativen Analyse untersucht (Kapitel 2). Eine grundsätzliche Unterscheidung besteht zwischen Einprodukt- (2.1) und Mehrproduktmodellen (2.2). Innerhalb dieses Kapitels werden zwei Zielsetzungen verfolgt. Zum einen werden die Modelle anhand ausgewählter Kriterien verglichen und andererseits bereits auf ihre Anwendbarkeit in Bezug auf eine Losgrößenoptimierung über Prozesse hinweg untersucht. Die zweite grundlegende Sichtweise für diese Arbeit ist die Prozessorientierung (Kapitel 3). Im Anschluss einer

kurzen Definition des Prozessmanagements und des Lean Managements, als weitverbreitetste prozessorientierte Managementansätze wird die Auswirkung der Prozessorientierung auf Losgrößenentscheidungen erörtert (3.4). Gängigste Beispiele aus der Unternehmenspraxis hierfür sind der *One Piece Flow*, die *Kanban Steuerung*, und der *EPEI*. Abbildung 1-1 zeigt die Säulen der Arbeit und die verwendete Vorgehensweise.

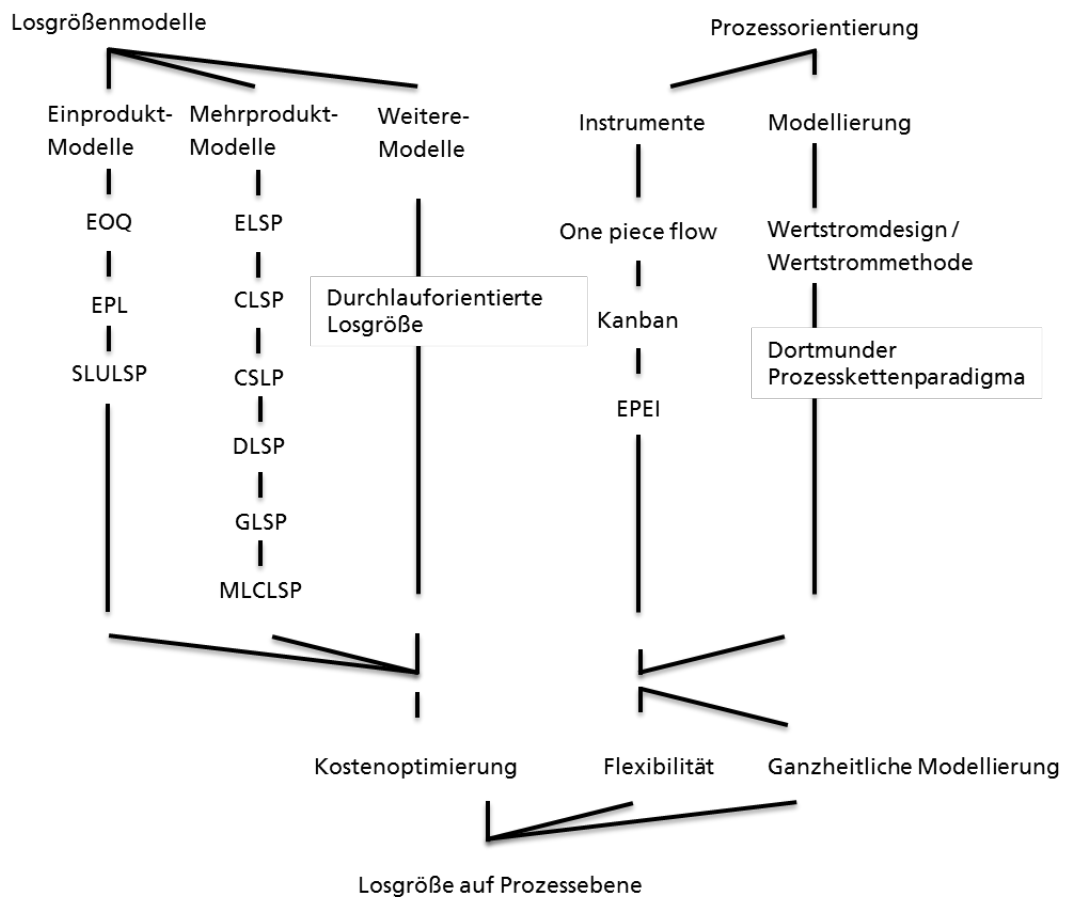


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Im Rahmen der zwei Hauptthemen Losgrößenoptimierung und Prozessorientierung werden die Schwächen bestehender Verfahren ergründet und die drei Säulen für die Losgrößenoptimierung auf Prozessebene erarbeitet. Diese sind *ganzheitliche Modellierung*, *Flexibilität* und *Kostenoptimierung*. Auf dieser – eher theoretischen – Basis wird ein Verfahren zur Losgrößenoptimierung auf Prozessebene entwickelt, das die drei Kriterien aufgreift und zu einer ganzheitlichen Modellierungs- und Optimierungssystematik vereint. Dazu ist es erforderlich, die Sichtweise der Losgrößenoptimierung von Produktionsabläufen auf Logistik- und andere Prozesse auszuweiten. Nur so ist es möglich, die gesamte Prozesskette zu berücksichtigen.

Um valide, spezifische Rückschlüsse ziehen zu können, muss der vergleichsweise weite Betrachtungsbereich in anderer Weise eingeschränkt werden. Der Untersuchungsbereich dieser Arbeit umfasst sämtliche repetitive Tätigkeiten der Serienproduktion. Jedoch

sollen nicht ausschließlich Produktionsprozesse und deren Verfahren betrachtet werden, sondern darüber hinaus auch Logistikprozesse, wie beispielsweise das Transportieren. Verfahren der Prozessindustrie,² einmalige Tätigkeiten und Projektarbeiten werden jedoch ausgeschlossen. Das gilt insbesondere für chemische und biologische Produktionsverfahren, bei denen die Produktions- (bzw. Bearbeitungs-)Prozesse nur unter vielfältigen Randbedingungen reproduzierbar und änderbar sind und deren Rüst- (bzw. Produktwechsel-)Zeiten ebenfalls meist nur schwer beeinflusst werden können.

Um eine umfassende Modellierung zu erreichen und den Fokus der Losgrößenbetrachtungen zu erweitern, werden in Kapitel 4.1 zwei prozessorientierte Verfahren zur Darstellung und Modellierung von Material- und Informationsflüssen vorgestellt. Es handelt sich um die Wertstrommethode und das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium. Beide haben sich durch vielfältige Anwendungen bewährt und liefern wichtige Anhaltspunkte für eine Losgrößenoptimierung auf Prozessebene. Sie werden einander gegenübergestellt (Kapitel 4.1.3) und auf ihre Tauglichkeit bei der Losgrößenoptimierung hin untersucht. Die ganzheitliche Modellierung bildet den Bezugsrahmen zur Analyse unterschiedlicher Prozesse verschiedener Branchen und mit unterschiedlicher Wertschöpfungstiefe. Auf diese Weise werden deren Prozesscharakteristika vergleichbar und Anforderungen in Bezug auf Losgrößenbildung können herausgearbeitet werden. Dazu werden Wertschöpfungs-, Rüst- und Lagerprozesse detailliert dargestellt, um anschließend Einzelprozesse sowie Prozessketten zu betrachten. Im Zuge der Prozessanalyse werden erforderliche Kennzahlen erhoben, die als Eingangsgrößen für die Losgrößenverfahren genutzt werden. Da eine Losgröße immer nur in Bezug auf unterschiedliche Kriterien *optimal* sein kann, werden in dieser Arbeit unterschiedliche Optimierungskriterien zur Losgrößenberechnung vorgestellt und miteinander verglichen. Diskutiert wird hier insbesondere das Spannungsverhältnis zwischen Flexibilität einerseits und Kostenoptimierung andererseits (4.2 – 4.3).

Um die Praktikabilität des auf diese Weise entwickelten Verfahrens zu prüfen, wird es anschließend (Kapitel 5) auf zwei praktische Beispiele angewendet. Dabei wird die optimale Losgröße im ersten Beispiel für einen mehrstufigen Herstellungsprozess von Motoren in der Großserien-, bzw. Massenfertigung bestimmt. Die Dieselmotoren werden in einer Fließmontage zusammengesetzt und durchlaufen anschließend unterschiedliche Test- und Verpackungsprozesse. Die Teile-, bzw. Baugruppenbeschaffung, sowie die Distribution der Motoren ist über mehrere Länder und weitere Stufen organisiert, welche alle mit dem entwickelten Verfahren integriert

²In dieser Arbeit wird die *Prozessindustrie* als Industriebranche verstanden, der Unternehmen aus den Bereichen Chemie, Gasverarbeitung, Pharmazie, Lebensmittel-, Zucker-, Zellstoff-, Papier-, Glas-, Stahl- und Zementherstellung angehören.

und betrachtet werden. Im zweiten Beispiel handelt es sich um den ebenfalls mehrstufigen Herstellungsprozess von Rauchgasreinigungssystemen, die in Serien-, bzw. Kleinserienfertigung für die Automobilindustrie entwickelt werden. Abschließend wird das entwickelte Verfahren auf Basis der Praxisbeispiele kritisch reflektiert (Kapitel 6) und die wichtigsten Ergebnisse werden zusammengefasst sowie ein Ausblick auf weitere mögliche Forschungsansätze gegeben.

Für die Analyse der einzelnen Veröffentlichungen, in denen die Losgrößenverfahren entwickelt wurden, ist das Heranziehen von Sekundärliteratur unabdingbar. Die für diese Arbeit wichtigsten Werke sind von DOMSCHKE, SCHOLL und VOß das Werk mit dem Titel „Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte“ und von TEMPELMEIER „Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management“.

Neben der Primär- und Sekundärliteratur zu den Losgrößenverfahren und ablauforganisatorischer Aspekte der Produktionsplanung stammt ein Großteil der in dieser Arbeit verwendeten Literatur aus praxisnahen Veröffentlichungen des *Lean Enterprise Institutes* und der *Productivity Press*, sowie aktuellen Veröffentlichungen zum Thema *Industrie 4.0*. Diese stellen die klassische Fragestellung der Losgrößenoptimierung in den aktuellen Kontext dezentraler, vernetzter und autonomer Strukturen. Insbesondere sind hier die von der Bundesregierung veröffentlichten Leitlinien und das Werk „Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik“ zu nennen. Eine umfassende Modellierung wird durch die prozessorientierten Verfahren der Wertstrommethode und des Dortmunder Prozesskettenparadigmas erreicht, dazu sind vor Allem die Werke „Wertstromdesign – der Weg zur Schlanken Fabrik“ und „Learning to See“ zu nennen, sowie die Literatur von KUHN, VINZ und QUINDT zum Dortmunder Prozesskettenparadigma. Sie liefern den erforderlichen theoretischen Bezugsrahmen für die Entwicklung und technische Anwendung des Losgrößenverfahrens auf Prozessebene.

2 Modelle und Verfahren zur Ermittlung optimaler Losgrößen

Ein Losgrößenmodell ist die vereinfachte mathematische Beschreibung einer Produktionsumgebung, in der unter Zuhilfenahme von Annahmen und Restriktionen eine Aussage über die Menge eines Produktes (Losgröße) getroffen werden soll, die ohne Unterbrechung produziert wird. Losgrößenmodelle werden in der Literatur im Wesentlichen anhand folgender Kriterien klassifiziert [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.70 ff.; ZÄPFEL 2001, S.32 f.]:

- Bekanntsein der Daten, insbesondere der Bedarfsmengen (deterministisch oder stochastisch)
- Zeitliche Entwicklung der Modellparameter, insbesondere der Absatzmengen (statisch oder dynamisch)
- Planungszeitraum (endlich oder unendlich)
- Anzahl der zu betrachtenden Produktionsstufen (einstufig oder mehrstufig)
- Anzahl der zu betrachtenden Produkte (Einprodukt- oder Mehrproduktmodelle)
- Berücksichtigung von Kapazitäten (beschränkt oder unbeschränkt)
- Berücksichtigung von Fehlmengen
- Zielgrößen, bzw. Optimierungsparameter

In der vorliegenden Arbeit wird die Losgrößenermittlung unter deterministischen Bedingungen betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass (Kunden-)Bedarfe im Voraus bekannt sind. Diese können im betrachteten Zeitverlauf schwanken oder aber konstant bleiben. Stochastische Einflüsse auf Bedarfszeitpunkte und -mengen werden folglich bei der Beschreibung von Modellen vernachlässigt.

Eine *optimale Losgröße* ist die Produktionsmenge, die auf Basis der getroffenen Annahmen und Restriktionen durch ein Lösungsverfahren ermittelt wird, sodass eine oder mehrere Zielgrößen optimiert werden. Die bekannteste Vorgehensweise zielt dabei auf eine Optimierung der Lager- und Rüstkosten.

Bei der Beschreibung und insbesondere beim Vergleich unterschiedlicher Losgrößenmodelle ist es notwendig, einheitliche Bezeichnungen zu verwenden. Für diese Arbeit werden folgende Variablen definiert:

n	Anzahl betrachteter Produkte
ME	Mengeneinheit
GE	Geldeinheit
ZE	Zeiteinheit
t	Zeit [ZE] oder Zeitperiode

t_B	Bearbeitungszeit [ZE]
t_R	Rüstzeit [ZE]
$d(t)$	Bedarf zum Zeitpunkt t [ME]
$y(t)$	Lagerbestand zum Zeitpunkt t [ME]
$x(t)$	Produktionsmenge zum Zeitpunkt t [ME]
c	Produktionsgeschwindigkeit [ME/ZE]
K	Gesamtkosten [GE]
k_L	Lagerkosten [GE/(ME*ZE)]
k_R	Rüstkosten [GE]
k_P	Produktionskosten [GE/ME]
q	Losgröße [ME]

Zur Beschreibung mancher Modelle sind zusätzliche und spezielle Variablen erforderlich. Diese werden direkt an den relevanten Stellen definiert.

Viele der Losgrößenmodelle wurden ursprünglich in englischer Sprache dargestellt. Im Englischen wird das Wort *problem* zur Beschreibung mathematischer Fragestellungen und Modelle verwendet. Im Folgenden wird der deutsche Begriff *Problem* synonym zum Begriff *Modell* verwendet, da sich dieser Wortsinn in der Literatur zur Losgrößenbetrachtung verbreitet hat. Wird von einem Problem gesprochen, ist damit folglich kein „praktisches Problem“ gemeint, sondern vielmehr eine abstrakte, meist vereinfachte Darstellung der Realität.

2.1 Einproduktmodelle

In diesem Kapitel werden zunächst Modelle vorgestellt, die sich auf die Betrachtung eines Produktes beschränken. Damit wird zugleich ein chronologischer Überblick über die (historische) Entwicklung der Losgrößenermittlung gegeben. Hieraus wird die Vorgehensweise zur Ermittlung einer optimalen Losgröße leicht ersichtlich und es werden grundlegende Überlegungen angestellt, die später zu komplexeren, realitätsnäheren Verfahren verallgemeinert und ergänzt werden können.

2.1.1 Economic Order Quantity Model (EOQ-Modell)

Ursprünglich stellte die Ermittlung der optimalen Losgröße das Optimierungsproblem von Lager- und Rüstkosten dar. FORD WHITMAN HARRIS entwickelte ein entsprechendes

Modell im Jahre 1913.³ Dabei ging er davon aus, dass die Lagerkosten linear mit der Losgröße ansteigen, wohingegen die Rüstkosten pro Stück degressiv mit steigender Losgröße sinken. Die Lagerkosten werden durch einen konstanten Bevorratungskostenfaktor pro Stück berücksichtigt und die Rüstkosten gleichmäßig auf die Einzelprodukte verteilt. Dies hat den degressiven Verlauf der Kostenfunktion zur Folge. Denn je größer das Los, desto mehr Fertigprodukte gibt es, auf die sich die Rüstkosten verteilen lassen.

Diese beiden Kostenverläufe werden im EOQ-Modell zur Gesamtkostenfunktion zusammengefasst.

Für die Anwendbarkeit des Modells werden folgende Annahmen getroffen:⁴

- Die Bedarfsmenge ist bekannt und zeitlich konstant
- Unendlicher Planungshorizont
- Die Produktion erfolgt in einem Prozessschritt
- Dieser Prozessschritt hat freie Kapazitäten und ist in der Lage, das gesamte Los auf einmal zu produzieren
- Bei der Produktion eines Loses entstehen Rüstkosten, die von der Losgröße unabhängig sind
- Der Lagerabgang ist kontinuierlich
- Fehlmengen und Lieferverzug können nicht entstehen
- Der Lagerkostensatz ist im Zeitverlauf konstant

Legt man zusätzlich zu diesen Rahmenbedingungen eine unendliche Produktionsgeschwindigkeit zugrunde, so entsteht folgender Lagerbestandsverlauf:

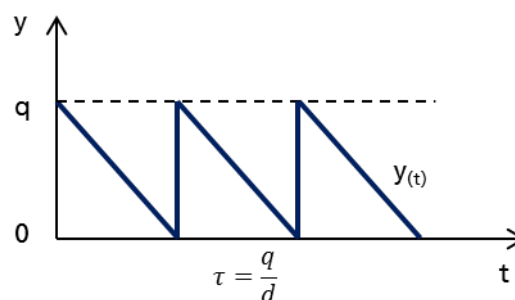


Abbildung 2-1: Lagerbestandsverlauf im EOQ-Modell [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.77]

³Die Entwicklung des EOQ- Modells wird mitunter auch WILSON beigemessen. Historische Einflüsse und Entwicklungen zum EOQ beschreibt DONALD ERLKOTTER in „FORD WHITMAN HARRIS and the Economic Order Quantity Model“ [ERLENKOTTER 1990, S.937 ff.].

⁴FORD W. HARRIS formuliert das Modell in seiner Veröffentlichung “How many Parts to make at once” von 1913 sehr praxisnah [HARRIS 1913, S.135 f.]. Die Annahmen zur Anwendbarkeit des EOQ- Modells finden sich beispielsweise bei DOMSCHKE, SCHOLL und VOSS [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.76 f.] Sie resultieren jedoch auch unmittelbar aus dem Modell.

Die Gesamtkostenfunktion für eine Periode setzt sich, wie eingangs beschrieben, aus der Rüstkosten- und der Lagerkostenfunktion zusammen. Um kostenminimal zu produzieren, kann das Optimierungsproblem wie folgt formuliert werden:

$$\frac{K}{t} = \frac{kR + kL \frac{q^2}{2d}}{\frac{q}{d}} = \frac{kR}{q} d + \frac{kLq}{2} \rightarrow \text{Min}$$

Durch Differenzialrechnung ergibt sich die optimale Losgröße im Modell von HARRIS zu:

$$q = \sqrt{\frac{2kRd}{kL}}$$

Die Gesamtkostenfunktion hat an der Stelle ihr Minimum, an der sich die Lagerkostenfunktion und die Rüstkostenfunktion schneiden. Die Losgröße q stellt ein Gleichgewicht zwischen den Lager- und den Rüstkosten in der Periode t her.

Im deutschsprachigen Raum wird diese Losgrößenformel häufig unter dem Namen ANDLER-Formel geführt. KURT ANDLER bestimmte den durchschnittlichen Lagerbestand in seiner Dissertation aus dem Jahre 1929 jedoch nicht als Hälfte der Losgröße, sondern als Hälfte des Terms: Losgröße, reduziert um eine Entnahmemenge [KRIEG 2005, S.20]. Folglich unterscheiden sich die ANDLER und HARRIS Formel und führen zu unterschiedlichen optimalen Losgrößen. In seiner Dissertation gibt ANDLER jedoch der Formel von HARRIS den Vorzug, da sie für die „praktische Anwendung die einfachste ist“ [ANDLER 1929, S.55]. Einen Vergleich der Formeln und weiterführende Betrachtungen stellt GEORG KRIEG in seiner Veröffentlichung „Neue Erkenntnisse zu Andlers Losgrößenformel“ aus dem Jahr 2005 an [KRIEG 2005].

2.1.2 Economic Production Lot (EPL-Modell)

Wird dem Modell von HARRIS eine *endliche* Produktionsgeschwindigkeit zugrunde gelegt, ansonsten jedoch sämtliche Annahmen beibehalten, so können zwei Fälle unterschieden werden:

1. Erfolgt bereits während der Produktion ein Abgang von Waren zum Lager, wird dies als *offene Fertigung* bezeichnet.
2. Wird das gesamte Los der Fertigprodukte erst nach Abschluss des Produktionsprozesses gesammelt an ein Lager übergeben, so spricht man von *geschlossener Fertigung*.

Das Verfahren von HARRIS wurde im Jahre 1918 von TAFT erweitert, so dass eine offene Fertigung abgebildet werden konnte [TAFT 1918, S.1410 ff.]. TAFT geht von der Voraussetzung aus, dass die Produktionsrate größer als die Nachfrage sein muss, um den Bedarf zu decken. Fehlmengen sind folglich auch im EPL-Modell nicht zugelassen. Bis auf die angepasste Produktionsgeschwindigkeit unterscheidet sich die

Vorgehensweise im EPL-Modell nicht von der des EOQ-Modells. Es wird ebenfalls ein Gleichgewicht der Rüst- und Lagerkostenfunktion angestrebt. Die folgende Abbildung zeigt die Auswirkungen der zeitlichen Änderung:

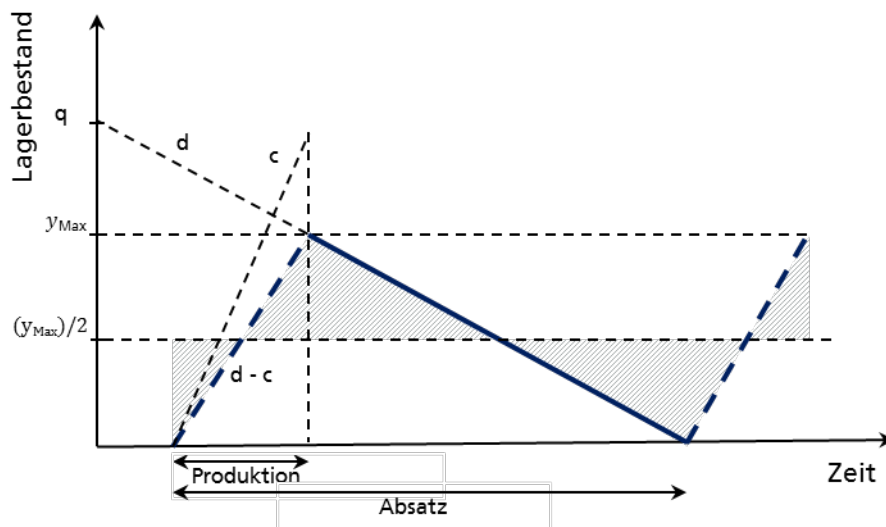


Abbildung 2-2: Reduktion der maximalen Lagermenge im EPL-Modell [TAFT 1918, S.1410]

Die maximale Lagermenge wird aufgrund der offenen Fertigung reduziert, da bereits während der Produktionsphase Fertigprodukte abgesetzt werden. Die maximale Lagermenge ergibt sich somit zu:

$$yMax = \frac{(c - d)q}{c}$$

Über den Zeitverlauf kann die Lagerbestandsentwicklung im EPL-Modell mit offener Fertigung, wie folgt dargestellt werden:

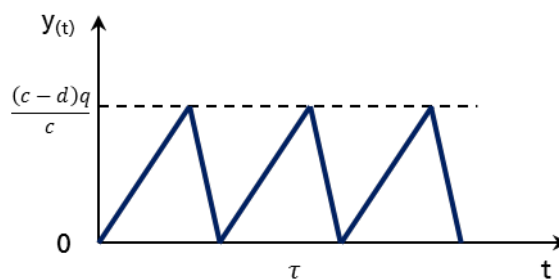


Abbildung 2-3: Lagerbestandsverlauf im EPL-Modell [REITNER 2007, S.9]

Die Gesamtkostenfunktion pro Periode ist in diesem Falle ebenfalls die Summe der Rüst- und Lagerkostenfunktion. Das Minimierungsproblem kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{K}{t} = \frac{kR + \frac{\frac{q^2(1-\frac{d}{c})kL}{2}}{\frac{q}{d}}}{\frac{q}{d}} = \frac{kR}{q}d + \frac{q}{2}\left(1 - \frac{d}{c}\right)kL \rightarrow \text{Min}$$

Analog zur Vorgehensweise im Modell von HARRIS folgt die optimale Losgröße:

$$q = \sqrt{\frac{2kRd}{kL\left(1 - \frac{d}{c}\right)}}$$

Im Falle einer geschlossenen Fertigung erhöhen sich der Lagerbestand und somit auch die durchschnittliche Lagermenge, weil die Produktion des neuen Loses bereits beginnt, während die letzten Fertigprodukte des vorherigen Loses noch ausgeliefert werden. Demzufolge ändert sich die Funktion der Lagerkosten pro Periode zu:

$$\frac{KL}{t} = \frac{\frac{q^2}{d}\left(1 + \frac{d}{c}\right)kL}{2}$$

Die optimale Losgröße für eine geschlossene Fertigung ist:

$$q = \sqrt{\frac{2kRd}{kL\left(1 + \frac{d}{c}\right)}}$$

Sowohl mit dem EOQ- als auch mit dem EPL-Modell können mehrere Produkte, bzw. Produktvarianten nur unabhängig voneinander, also durch mehrfache Anwendung der beschriebenen Systematik betrachtet werden. Im Folgenden werden das EOQ- und das EPL-Modell auch als *klassische Losgrößenverfahren* bezeichnet.

2.1.3 Single-Level Uncapacitated Lot Sizing Problem (SLULSP)

Das Single-Level Uncapacitated Lot Sizing Problem erweitert die klassischen Losgrößenverfahren. Es wird in der Literatur auch unter dem Namen WAGNER-WHITIN-Problem [TEMPELMEIER 2006, S.138; DOMSCHKE ET AL. 1997, S.115] geführt, nach HARVEY M. WAGNER und THOMSON M. WHITIN, die das Modell 1958 entwickelten [WAGNER & WITHIN 1958, S.98 f.]. Es unterscheidet sich von den klassischen Losgrößenverfahren durch im Zeitverlauf schwankende Bedarfsmengen.

Des Weiteren gelten folgende Annahmen für das SLULSP [WAGNER & WITHIN 1958, S.89 f.]:

- Bedarfe stehen jeweils bereits zu Beginn einer Periode fest.
- Es wird eine endliche Zahl zeitlich diskreter Perioden ($t = 1, \dots, T$) betrachtet.
- Die Produktion erfolgt in einem Prozessschritt. Nach der Produktion ist das gesamte Los sofort verfügbar.

- Der Produktionsprozess hat freie Kapazitäten und ist in der Lage, das gesamte Los auf einmal zu produzieren.
- Fehlmengen und Lieferverzug können nicht entstehen.
- Negative Werte für Bedarfe, Kosten, Lagerbestände oder Losgrößen sind nicht zugelassen: ($d(t) \geq 0$, $K(t) \geq 0$, $y(t) \geq 0$; $q(t) \geq 0$)

Vor jeder Periode wird entschieden, ob ein Los produziert wird. Dazu nutzen WAGNER und WHITIN eine binäre Variable

$$\delta(q(t)) = \begin{cases} 0, & q(t) = 0 \\ 1, & q(t) > 0 \end{cases}$$

die anzeigt, ob in der Periode t ein Los $q(t)$ gefertigt wird oder nicht. Wird die Entscheidung getroffen, ein Los zu fertigen, so entstehen Rüstkosten die von der Losgröße unabhängig sind. Analog zu den klassischen Losgrößenverfahren, ist das Ziel im WAGNER-WHITIN Modell ebenfalls die Minimierung der Gesamtkostenfunktion:

$$K = \sum_{t=1}^T kR(t) \delta(q(t)) + kL(t)y(t) \rightarrow \text{Min}$$

Zur Beschreibung der Lagerbestandsentwicklung wird ein Vergleich der Bestände der Vorperiode mit den Zu- und Abgängen der aktuellen Periode herangezogen.

$$y(t) = y(t - 1) + q(t) - d(t)$$

$$y(0) = y(T) = 0$$

Diese Betrachtungsweise bezeichnet man als Lagerbilanz und die Formeln als Lagerbilanzgleichungen. Das SLULSP kann anhand exakter oder heuristischer Verfahren gelöst werden. Dazu wurden unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt, von denen einige im Folgenden kurz skizziert werden:

Durch *dynamische Optimierung* kann iterativ eine exakte Lösung für das SLULSP ermittelt werden [DOMSCHKE & DREXL 1995, S.145 f.]. Außerdem geben DOMSCHKE, SCHOLL und VOB Lösungswege an, die das WAGNER-WHITIN Modell in ein *Problem der Bestimmung kürzester Wege* oder in ein *Warehouse-Location Problem* überführen und dafür dann ebenfalls eine exakte Lösung ermitteln. [DOMSCKE ET AL. 1997, S.117 ff.]

Heuristische Lösungsverfahren hingegen laufen häufig in zwei Phasen ab. Zunächst wird in einer *Eröffnungsphase* eine erste zulässige Lösung ermittelt, die dann in der zweiten Phase verbessert wird [SUHL & MELLOUL 2005, S.135 f.]. Die *Verbesserungsphase* setzt dann bei der zulässigen Lösung an und versucht diese schrittweise zu optimieren, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Einige gängige heuristische Verfahren werden im Folgenden kurz skizziert:

Die *SILVER-MEAL-Heuristik* [SILVER & MEAL 1973, S.64 ff.] startet in der ersten Periode und fasst die Bedarfe aufeinanderfolgender Perioden zusammen, solange sich die durchschnittlichen Kosten pro Periode nicht erhöhen.

Das *Least Unit Cost-Verfahren (LUC)*, (deutsch: *Verfahren der gleitenden wirtschaftlichen Losgröße*) geht analog zur *SILVER-MEAL-Heuristik* vor, unterscheidet sich jedoch im Abbruchkriterium. Es fasst die Periodenbedarfe zusammen, solange die Stückkosten sinken.

Das *Part Period Balancing (PPB)*, fasst Periodenbedarfe zusammen, solange die Lagerkosten die Rüstkosten nicht übersteigen. Damit werden die Lagerkosten den Rüstkosten angenähert, bis diese nahezu ausgeglichen sind. Dieses Verfahren wird im deutschsprachigen Raum *Kostenausgleichs-* oder *Stückperiodenausgleichsverfahren* genannt.

Das *Grenzkostenverfahren* von GROFF fasst Periodenbedarfe zusammen, solange bei marginaler Änderung die durchschnittliche Verringerung der Rüstkosten pro Periode die durchschnittliche Erhöhung der Lagerkosten übersteigt. [GROFF 1979, S.47 ff.]

Die iterativen Vorgehensweisen der Verfahren und deren mathematisch formulierte Abbruchkriterien, sowie Verfahrensvergleiche und Fehlerabschätzungen sind für diese Arbeit nicht relevant. Damit setzen sich beispielsweise ZOLLER und ROBRADÉ in ihrem Werk „Dynamische Bestellmengen- und Losgrößenplanung. Verfahrensübersicht und Vergleich“ auseinander [ROBRADÉ & ZOLLER 1987, S.219 ff.].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die genannten Heuristiken schrittweise eine Näherungslösung des SLULSP herbeiführen und sich dabei die Kostenzusammenhänge, die bei der Formulierung des EOQ-Modells erläutert wurden, zu Nutze machen.

2.2 Mehrproduktmodelle

In Einproduktmodellen werden die Optimierungsprobleme stark vereinfacht: Losgrößen werden nur für jeweils ein Produkt, das in einem Produktionsschritt gefertigt wird, ermittelt. In der Realität ist es jedoch häufig so, dass ein Produktionsprozess in der Lage ist, mehrere verschiedene Produkte zu produzieren. In diesem Kapitel werden Modelle vorgestellt, die sich mit der Ermittlung optimaler Losgrößen für gemeinsam zu produzierende Produkte befassen.

2.2.1 Economic Lot Sizing and Scheduling Problem (ELSP)

Die Bezeichnung *Economic Lot Sizing and Scheduling Problem* (nachfolgend: ELSP) geht auf den Artikel “A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem” von Professor JACK D. ROGERS aus dem Jahr 1958 zurück, in dem er diese Bezeichnung erstmalig verwendet [ROGERS 1958, S.264 ff.]. Der Artikel beschreibt die

Erweiterung des EPL-Modells um vektorielle Größen. Das ermöglicht erstmalig die Betrachtung mehrerer Produkte in einem Losgrößenmodell. Daraus resultiert jedoch auch unmittelbar die Fragestellung, in welcher Produktionsreihenfolge die einzelnen Produkte gefertigt werden sollen. In der deutschsprachigen Literatur ist dieses Modell deshalb auch unter dem Namen *Problem optimaler Sortenschaltung* zu finden. [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.90]

Folgende Annahmen liegen dem ELSP zugrunde [ROGERS 1958, S.264 ff.]:

- Die Bedarfsmengen sind bekannt und zeitlich konstant (von den unterschiedlichen Produkten werden im Zeitverlauf immer gleiche Mengen nachgefragt = konstante Absatzgeschwindigkeit)
- Der Lagerkostensatz ist im Zeitverlauf konstant
- Es können unterschiedliche Produkte/ Produktvarianten produziert werden
- Unterschiedliche Produkte können jedoch nicht gleichzeitig produziert werden
- Die Produktion erfolgt in einem Prozessschritt
- Bei der Produktion eines Loses entstehen Rüstkosten, die von der Losgröße unabhängig sind
- Fehlmengen und Lieferverzug sind nicht zugelassen

Wird die Gesamtmenge von n Produkten bzw. Produktvarianten betrachtet, so besitzt jedes Produkt, $i = 1, \dots, n$, einen spezifischen Bedarf, sowie spezifische Rüst- und Lagerkosten. Im Gegensatz zu den vorherigen Betrachtungen werden die Variablen, die diese Größen repräsentieren, im Folgenden nicht mehr als skalare Größen, sondern als Vektoren mit n Dimensionen formuliert.

Zusätzlich zur Optimierung der Lager- und Rüstkosten ist es beim ELSP erforderlich, den Zeitraum (*Periodendauer*, oder englisch *cycle time*) zu ermitteln, in dem ein jedes Produkt produziert wird. Im ELSP wird somit das Ziel verfolgt, eine Losreihenfolge und einen "entsprechenden Produktionsplan[es] auf der Engpassmaschine [zu bestimmen] so dass die mittleren Gesamtkosten pro Zeiteinheit minimiert werden" [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.91]. Dazu wird die Zielfunktion

$$\sum_{i=1}^n \frac{Ki}{ti} = \sum_{i=1}^n \frac{kRi}{ti} + \frac{kLi di \left(1 - \frac{di}{ci}\right) ti}{2} \rightarrow Min$$

verwendet, die wiederum die Rüst- und Lagerkosten pro Periode summiert. Die Produktionsgeschwindigkeit c ist dabei ebenfalls eine Vektorgroße, die je nach Produkt variiert. Als Nebenbedingung gilt⁵, dass eine überschneidungsfreie Maschinenbelegung gewährleistet werden muss. Das heißt, dass jede Maschine zu jedem Zeitpunkt nur

⁵Die Nebenbedingung resultiert unmittelbar aus der Annahme, dass nicht mehrere Produkte gleichzeitig produziert werden können.

einfach belegt sein darf und alle Produkte im gesamten Planungszeitraum gefertigt werden können. Lösungen die diese Nebenbedingung nicht erfüllen werden als unzulässig bezeichnet.

Dieses allgemein formulierte ELSP-Problem ist aufgrund seiner Komplexität NP-Schwer ⁶ [HSU 1983, S.93 ff.]. In der Literatur werden Lösungsstrategien vorgeschlagen, die entweder zusätzliche Annahmen bzw. Nebenbedingungen formulieren um das Modell zu vereinfachen, oder auf heuristische Lösungsverfahren zurückgreifen [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.90 ff.].

Wird das ELSP dahingehend vereinfacht, dass im gesamten Planungszeitraum gleichlange Loszyklen angenommen werden, ergibt sich die zusätzliche Nebenbedingung: $t_1 = t_2 = \dots = t_n$. Dieses Verfahren wird als *Common Cycle Approach* bezeichnet. HANSSMANN leitet die optimale Periodendauer t_0 für den Common Cycle Approach her, indem er das Produkt bestimmt, für welches das Verhältnis der Rüstkosten zu den mit Lagerkosten bewerteten Bedarfsmengen am geringsten ist. Als gemeinsame Periodendauer gibt er

$$t_0 = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n kR_i}{\sum_{i=1}^n kL_i d_i (1 - \frac{d_i}{c_i})}}$$

an [HANSSMANN 1962, S.159 (Gleichung 7.24)]. Als weiteren Ansatz zur Vereinfachung formuliert BOMBERGER die Annahme, dass jeder Loszyklus das Vielfache eines Basiszyklus ist ($t_i = n_i t_B$). Dieses Verfahren wird als *Basic Period Approach* bezeichnet. Wird dieses System befolgt, entstehen Belegungsstrategien, die nicht zwangsläufig optimal sind, aber zu denen immer eine zulässige Lösung existiert [BOMBERGER 1966, S.779 ff.].

Im Kontext dieser Arbeit sei die Erweiterung des ELSP-Modells von HAHM und YANO zum *Economic Lot and Delivery Scheduling Problem* (ELDSP) erwähnt, die im Jahr 1995 veröffentlicht wurde [HAHM & YANO 1992, S.235 ff.]. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Produkte chargenweise an einem Standort produziert, jedoch an einem anderen Standort weiterverwendet werden. Ein Transportprozess ist somit zwangsläufig erforderlich und wird zusätzlich zur Produktion betrachtet. Zur Lösung des ELDSP wird das Problem geteilt und sowohl die Bestandsentwicklung beim versorgenden Prozess als auch die des Kundenprozesses betrachtet. Ziel ist die Minimierung der durchschnittlichen Kosten pro Zeiteinheit der Produktion, sowie der

⁶Ein NP-Schweres Problem ist mit vorhandenen Ressourcen nicht in Polynomialzeit lösbar. Die benötigte Rechenzeit einer deterministischen Rechenmaschine wächst mit der Problemgröße stärker als eine Polynomfunktion. So wird eine Grenze zwischen praktisch lösbaren und praktisch nicht lösbaren Problemen beschrieben. Der Aufwand für NP-Schwere Probleme, wächst so schnell, dass die Problemgrößen mit derzeit verfügbaren Rechenkapazitäten nicht in überschaubaren Zeiträumen gelöst werden können.

Rüst-, Bestands-, und Transportkosten. Der Transportprozess wird zunächst unabhängig von Produktions- und Kundenprozess betrachtet.

Anschließend werden die Teilprobleme analog zum EOQ- Modell gelöst. Dazu wird vor jeder Auslieferung ein Lageraufbau des vorgelagerten Prozesses berücksichtigt [HAHM & YANO 1992, S.240]. Angestrebt wird eine Synchronisation der Prozesse und dazu auch eine mathematische Formulierung zur Quantifizierung der Synchronität angegeben [HAHM & YANO 1992, S.240 f.]. Da das Modell von HAHM und YANO jedoch wieder auf ein Einproduktmodell zurückführt, wird dieses hier nicht genauer betrachtet.

In der Literatur [GIRI & MOON 2004, S.677 ff.; SOMAN ET AL. 2004, S.1677 ff.] wird das ELSP darüber hinaus zur Lösung von Problemen mit Stillstandskosten und beschränkter Haltbarkeitsdauer der Erzeugnisse verwendet. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Annahmen werden unterschiedliche Basispolitiken und auch der Common Cycle Approach zur Analyse verwendet.

2.2.2 Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP)

Das *Capacitated Lot Sizing Problem* (nachfolgend: CLSP) beschreibt ein Modell, in dem unterschiedliche Produkte durch eine Ressource in einer Zeitperiode produziert werden können. Im Gegensatz zum ELSP sieht das CLSP keine unmittelbare Reihenfolgeplanung der Produkte vor. Es erweitert vielmehr das oben beschriebene SLULSP auf mehrere Produkte, insofern kann das SLULSP auch als Spezialfall des CLSP verstanden werden. Dem CLSP liegen folgende Annahmen zugrunde [DOMSCHKE ET AL. 1997, S.134 ff.]:

- Zeitlich diskrete Perioden ($t = 1, \dots, T$)
- Im Zeitverlauf schwankende (dynamische) Nachfrage
- Produktion in einem Prozessschritt
- Rüstprozess vor jedem Produktionsprozess
- Pro Periode können mehrere Produkte gefertigt werden
- Beschränkte Produktionskapazität C_t im Produktionsprozess
- Keine Fehlmengen oder Lieferverzug
- Von der Losgröße unabhängige (fixe) Rüstkosten, wenn die Entscheidung getroffen wird ein Produkt zu fertigen
- Lineare Lagerkosten
- Keine negative Bedarfe, Kosten, Lagerbestände oder Losgrößen
($d(t) \geq 0, K(t) \geq 0, y(t) \geq 0; q(t) \geq 0$)

Ziel ist die Ermittlung der Losgrößen, bei denen die Gesamtkostenfunktion

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (kRi\delta_i(t) + kLiy_i(t) + kPi(t)q_i(t)) \rightarrow Min$$

minimal wird und alle Bedarfe gedeckt werden. Analog zum *WAGNER-WHITIN-Problem* gibt die Binärvariable $\delta_i(q(t))$ an, ob in der Periode t ein Produktionslos $q_i(t)$ des Produktes i produziert wird oder nicht. Ebenfalls analog zum SLULSP werden die Lagerbestandsentwicklungen durch periodenweisen Vergleich der Bestände beschrieben. Diese Formeln werden in der Literatur *Lagerbilanzgleichungen* genannt.

$$y(t) = y(t - 1) + q(t) - d(t)$$

$$y(0) = y(T) = 0$$

Außerdem gilt, dass der erforderliche Kapazitätsbedarf pro Periode die verfügbare zeitliche Kapazität nicht übersteigen darf. Es muss also gelten, dass

$$c_i q_i(t) \leq C_t \delta_i(t)$$

Bei der allgemeinen Formulierung⁷ des CLSP handelt es sich um ein NP-schweres Problem [FLORIAN ET AL. 1980, S.669 ff.]. Zu dessen Lösung existieren sowohl exakte als auch heuristische Verfahren. Die Lösungsverfahren können anhand ihrer Vorgehensweise in

- Verfahren der periodenorientierten Dekomposition,
- Set-Partitioning-Ansätze,
- Primal Dual-Heuristiken und
- Branch and Bound-Verfahren

untergliedert werden [DERSTROFF 1993, S.39].

Verfahren zur periodenorientierten Dekomposition beginnen von der ersten Periode an, zulässige Lösungen für die einzelne Periode zu ermitteln. Aus diesen Lösungen wählen sie anschließend jeweils die Beste aus, bis das Abbruchkriterium erreicht ist. So wird der Planungshorizont sukzessive abgearbeitet.

Verfahren auf Basis des *Set-Partitioning-Ansatzes* gehen so vor, dass ausgehend von der Menge aller zulässigen Lösungen die Produktionspläne produktweise betrachtet werden. Auf dieser Basis wird dann der kostenminimale Produktionsplan ausgewählt. Zulässige Lösung bedeutet, dass alle vorgegebenen Restriktionen erfüllt sind.

Primal-Dual-Heuristiken und *Branch and Bound-Verfahren* schränken das Problem durch obere und untere Schranken ein und nähern sich durch das Ausgrenzen unzulässiger Lösungen an die Lösung an. Die beiden Herangehensweisen unterscheiden sich in ihrer Vorgehensweise zur Aktualisierung der Grenzen.

Zwei heuristische Verfahren zur periodenorientierten Dekomposition seien hier kurz erwähnt, weil sie auf die oben genannten Vorgehensweisen für Einprodukt-Modelle aufbauen:

⁷„Allgemeine Formulierung“ bedeutet, dass Rüstkosten und Rüstzeiten mitbetrachtet werden.

Erstens: DIXON und SILVER leiten eine allgemeingültige Formulierung der *SILVER-MEAL HEURISTIK* [DIXON & SILVER 1981, S.23 ff.] her. Diese geht analog zur oben vorgestellten Vorgehensweise vor und startet von der ersten Periode an, Periodenbedarfe zusammenzufassen, solange sich die durchschnittlichen Kosten pro Periode nicht erhöhen. Jedoch wird zusätzlich überprüft, ob die benötigte Kapazität ausreichend ist. Die durchschnittliche Kostenreduktion wird dabei durch die Formel:

$$\Delta_{i,t} = \frac{K_{i,t} - K_{i,t+1}}{c_{i,t+1}}$$

beschrieben.

Zweitens: Gleiches gilt für die Verallgemeinerung des *Grenzkostenverfahrens von GROFF*, wobei jedoch das Abbruchkriterium verwendet wird, dass bei marginaler Änderung der Periodenlänge die durchschnittliche Verringerung der Rüstkosten pro Periode die durchschnittliche Erhöhung der Lagerkosten nicht übersteigen darf.⁸

TEMPELMEIER stellt außerdem die Möglichkeit vor, das CLSP auf ein *Kürzeste-Wege-Problem* zurückzuführen, welches anschließend um Kapazitätsrestriktionen ergänzt wird [TEMPELMEIER 2006, S.163]. Neben den hier genannten Verfahren existiert eine Vielzahl anderer exakter und heuristischer Verfahren zur Lösung des CLSP. Eine Übersicht gibt DERSTROFF in seinem Werk „Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen“ [DERSTROFF 1993, S.38 f.].

2.2.3 Continuous Setup Lot Sizing Problem (CSLP)

Das CSLP verändert das *Capacitated Lot Sizing Problem* so, dass Rüstkosten nur noch zu Beginn der Produktion von neuen Losen entstehen (nicht mehr zu Beginn jeder Periode). Wird die Produktion beispielsweise eine Periode lang unterbrochen und anschließend mit dem gleichen Produkt wieder aufgenommen, so entstehen im CSLP keine erneuten Rüstkosten [DREXL & KIMMS 1997, S.221 ff.]. In der Gesamtkostenfunktion wird das durch eine Zustandsänderung der Binärvariable $\delta_i(t)$ im Vergleich zur Vorperiode $\delta_i(t-1)$ ausgedrückt:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \left(kR \max(0, \delta_i(t) - \delta_i(t-1)) + kL i y_i(t) + kP i(t) q_i(t) \right) \rightarrow \text{Min}$$

Darüber hinaus werden alle weiteren Annahmen des CLSP weiter beibehalten, so dass die Lagerbilanzgleichung und die Kapazitätsrestriktion wie zuvor beschrieben erhalten bleiben. Die Nichtnegativitätsbedingungen gleichermaßen. Lösungsverfahren für dieses NP-schwere Problem ähneln denen des CLSP. In der Literatur [HELBER 1994, S.296 ff.;

⁸Für eine mathematische Formulierung des Abbruchkriteriums sei an dieser Stelle beispielsweise auf GÜNTHER verwiesen [GÜNTHER 1987, S. 137].

KRAMARKAR & SCHRAGE 1985, S.326 ff.; GOPALAKRISHNAN ET AL. 1995, S.1973 ff.] wird das CSLP auch als *Capacitated Lot Sizing Problem with Linked Lotsizes* oder als CLSP mit *Setup Carry-over* bezeichnet.

2.2.4 Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem (DLSP)

Im *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem* (nachfolgend: DLSP) wird die Periodendauer t derart verringert, dass während einer Periode entweder nur ein oder kein Produkt hergestellt werden kann. In allen anderen Annahmen stimmt es mit dem CLSP überein. Das bedeutet, dass die Losgröße im Produktionsfall der vollen Produktionskapazität des Produktionsprozesses entspricht. Diese Strategie wird auch als „*all or nothing*“-Strategie bezeichnet. Wie bereits in anderen Modellen vorgestellt, kann eine solche Vorgehensweise im Modell durch die binäre Variable $\delta_i(t)$ abgebildet werden. Die Losgröße eines Erzeugnisses i zum Zeitpunkt t ($q_i(t)$) wird im DLSP also durch $c_i \delta_i(t)$ beschrieben. Alle anderen Annahmen werden beibehalten, sodass sich die Zielfunktion des DLSP wie folgt ausdrücken lässt:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (kRi \max(0, \delta_i(t) - \delta_i(t-1)) + kLi y_i(t) + kPi(t) c_i \delta_i(t)) \rightarrow \text{Min}$$

Die Lagerbilanzgleichungen gelten analog zum CLSP, jedoch mit der abweichenden Annahme, dass in einer Periode maximal ein Produkt produziert werden kann.

Eine Erweiterung des DLSP kann durch Ausweitung der all or nothing-Strategie von einem Produkt auf zwei oder mehr Produkte pro Periode erreicht werden. FLEISCHMANN, der das DLSP in „The discrete lot-sizing and scheduling problem“ definiert [FLEISCHMANN 1990, S.337 ff.], erweitert es beispielsweise zu einem Modell mit bis zu 125 Perioden [FLEISCHMANN 1994, S.337 ff.].

2.2.5 General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP)

FLEISCHMANN und MEYR erweitern die Modelle CLSP und DLSP zum General Lot Sizing and Scheduling Problem [FLEISCHMANN & MEYR 1997, S.11 ff.]. Das GLSP verallgemeinert alle bisher beschriebenen Modelle zu einem Grundmodell. FLEISCHMANN und MEYR unterteilen den Planungshorizont in *Mikro-* und *Makroperioden*. Ähnlich des CLSP können während einer Makroperiode unterschiedliche Produkte hergestellt werden, wohingegen in einer Mikroperiode analog zum DLSP immer nur ein Produkt produziert werden kann. Damit werden nicht nur die Betrachtungen des DLSP und des CLSP auf ein Mehrproduktproblem verallgemeinert, sondern es wird auch eine gemeinsame Basis für alle bislang vorgestellten Modelle formuliert.

Die Zielfunktion setzt sich aus der Lager- und Rüstkostenfunktion zusammen. Durch deren Minimierung sollen unter begrenzter Kapazität eine Losreihenfolge und die Losgröße ermittelt werden.

$$K = \sum_{i,t}^{n,T} k_L y_i(t) + \sum_{i,\tau}^{n,T} k_R \delta_i(\tau) \rightarrow \text{Min}$$

Lagerkosten k_L beziehen sich im GLSP auf ganze Makroperioden t und Rüstkosten k_R fallen bei jedem Produktwechsel von Produkt i auf Produkt j an. Dabei muss zu Beginn jeder Mikroperiode τ festgelegt sein, ob ein Produktwechsel (Umrüstvorgang) erfolgt. Analog zu vorherigen Modellen wird der Produktwechsel durch die binäre Zustandsvariable δ abgebildet. Die Lagerbilanzgleichung gilt wie folgt:

$$y_i(t) = y_i(t-1) + \sum_{i=1}^n x_i(\tau) - d_i(t)$$

Außerdem gilt, dass der erforderliche Kapazitätsbedarf pro Makroperiode, die verfügbare zeitliche Kapazität C_τ nicht übersteigen darf. Es muss also für alle Makroperioden sichergestellt sein, dass

$$\sum_{i=1}^n c_i q_i(t) \leq C_\tau$$

Beim GLSP handelt es sich um ein NP-vollständiges Problem [FLEISCHMANN & MEYR 1997, S.14], zu dessen Lösung FLEISCHMANN und MEYR heuristische Lösungsverfahren vorstellen. [FLEISCHMANN & MEYR 1997, S.14 ff.] Sie benutzen dazu Verfahren, die auf *threshold accepting* (deutsch: *Schwellenakzeptanz*⁹) beruhen.

Im Zuge des General Lot Sizing and Scheduling-Problems stellt sich die Frage, ob Losgrößenbetrachtungen und Rüstreihenfolge gleichzeitig geplant, oder in getrennte Entscheidungsprobleme überführt werden sollten. Denn auch heuristische Verfahren zerlegen die Komplexität in Teilprobleme, so dass die Produktionsreihenfolge meist zuerst festgelegt und anschließend zu der ermittelten Reihenfolge eine Losgrößenentscheidung getroffen wird. Je nachdem welche Restriktionen man zum GLSP hinzuzieht, erhält man eines der vorher beschriebenen Modelle.

2.2.6 Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem (MLCLSP)

TEMPELMEIER formuliert das dynamische, mehrstufige Losgrößenproblem so, dass mehrere Produktions- bzw. Dispositionsstufen betrachtet werden können [TEMPELMEIER

⁹Variation des *simulated annealing*, ein Optimierungsverfahren, bei dem von einem anfänglichen Schwellwert $T > 0$, durch ausprobieren, Referenzlösungen zu einer Anfangskonfiguration sucht, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.

2006, S.205 ff.]. Dazu verwendet er das CLSP als Basis, definiert jedoch zusätzlich Zwischenprodukte, die jeweils nach Abschluss eines Arbeitsgangs A entstehen. Die Zwischenprodukte werden im nächsten Produktionsschritt von anderen Ressourcen weiterverarbeitet, wodurch die gewünschte Topologie (Mehrstufigkeit) entsteht.

Im MLCLSP-Modell können in einer Periode beliebig viele Produkte produziert werden, sofern die Kapazität (s.u.) dazu ausreicht. Ziel des MLCLSP-Modells ist, wie beim CLSP auch, die Minimierung der Gesamtkostenfunktion. Diese besteht aus den Rüstkosten, den Lagerkosten und den variablen Produktionskosten:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (kR_i \delta_{i,t} + kL_i y_{i,t} + kP_i q_{i,t}) \rightarrow \text{Min}$$

Bezieht man die Sekundärbedarfe, das heißt die Bauteile und Baugruppen, die zur Herstellung der Produkte auf der nächst höheren Produktionsstufe benötigt werden,¹⁰ in die Lagerbilanz des CLSP ein, so ergibt sich folgende Lagerbilanzgleichung:

$$y_{i,t-1} + q_{i,t-z_i} - \sum_{k \in N_i} a_{i,k} q_{k,t} - y_{i,t} = d_{i,t}$$

z_i bezeichnet dabei die Vorlaufzeit z für den Arbeitsgang i . Diese wird immer dann verwendet, wenn ein Prozess nicht unmittelbar startbereit ist. Sie kann beispielsweise eingesetzt werden, falls Transportprozesse zwischen den Produktionsstufen durchlaufen werden müssen. N_i bezeichnet die Menge der Nachfolgerprodukte, beziehungsweise der direkt nachgelagerten Arbeitsprozesse von i [DERSTROFF 1994, S.37 ff.].

Die Nichtnegativitätsbedingungen des CLSP gelten im MLCLSP gleichermaßen. Darüber hinaus gilt folgende Kapazitätsrestriktion:

$$\sum_{i \in K_j} (t_{B_i} q_{i,t} + t_{R_i} \delta_{i,t}) \leq C_{j,t}$$

$C_{j,t}$ beschreibt die verfügbare zeitliche Kapazität einer Ressource j in Periode t , die mindestens so groß sein muss, wie die für das Bearbeiten und Rüsten in Anspruch genommene Zeit. TEMPELMEIER geht davon aus, dass unterschiedliche Arbeitsgänge in der Regel von unterschiedlichen Ressourcen durchgeführt werden [TEMPELMEIER 2006, S.204] und weist auf Schwierigkeiten hin, wenn kein Flussprinzip implementiert ist. Hauptgrund dafür ist, dass die Reihenfolge der Produktionsschritte zu zusätzlichen Wartezeiten führen kann.

¹⁰Sekundärbedarfe können sowohl selbst gefertigt, als auch extern zugekauft werden [Vgl. TEMPELMEIER 2006, S.205].

2.3 Weitere Modelle

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Losgrößenmodelle und die zugehörigen Lösungsverfahren geben einen chronologischen Überblick über die deterministische Losgrößenermittlung. Dabei wurden, ausgehend vom klassischen Grundmodell, immer weitere Verallgemeinerungen vorgenommen bis hin zum mehrstufigen *General Lot Sizing and Scheduling Problem*. Neben den beschriebenen Modellen existiert eine Vielzahl von Losgrößenmodellen, die beispielsweise stochastische Bedingungen einbeziehen. Das bedeutet, dass die Nachfragemengen und -zeitpunkte nicht als gegeben betrachtet werden, sondern dass auf Prognoseverfahren zurückgegriffen wird um diese vorherzusagen. Mit diesen Prognoseverfahren und stochastischen Daten können dann unter Anderem Losgrößenoptimierungen in den oben beschriebenen Modellen durchgeführt werden. Sie berücksichtigen beispielsweise die Prognose bei trendförmigen oder saisonal schwankenden Bedarfsmengen.¹¹

In der Kontrolltheorie werden außerdem dynamische Modelle betrachtet, in denen die Optimierungsprobleme durch stetige Funktionen beschrieben werden. Dabei werden regelungs-, bzw. kontrolltheoretische Ansätze zur Losgrößenermittlung verwendet. Diese betrachten Systemzustände im Zeitverlauf und versuchen anhand von Nebenbedingungen (Restriktionen) eine optimale Lösung des Problems zu ermitteln [GÜNTHER & TEMPELMEIER 2007, S.86 ff.]. Im Bereich der Kontrolltheorie sind die Modelle und Verfahren von KOGAN ET AL., ARROW-KARLIN, BAI und VARANASI zu nennen [REITNER 2007, S.17 ff.; ARROW-KARLIN 1958, S.61 ff.; BAI & VARANASI 1996, S.87 ff.].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch, einen dezentralen und prozessorientierten sowie praxisnahen Ansatz zur Losgrößenermittlung zu liefern. Dazu ist es zwar einerseits erforderlich, umfassend auf die bestehenden Modelle und Methoden zur Losgrößenermittlung einzugehen, andererseits jedoch die Komplexität der Verfahren in einem handhabbaren Umfang zu halten. Deshalb werden stochastische und kontrolltheoretische Verfahren in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Dennoch ist es möglich, die in dieser Arbeit betrachteten Verfahren in einer Simulation mit stochastischen Daten zu evaluieren.

2.4 Auswertung und Zusammenfassung

Im ersten Teil von Kapitel 2.2 wurden die klassischen Losgrößenverfahren vorgestellt. Sie beschreiben die Losgrößenermittlung als Optimierungsproblem aus Lager- und Rüstkosten. Damit bilden sie die gedankliche Grundlage vieler weiterer

¹¹Losgrößenverfahren unter stochastischen Bedingungen werden im Kontext dieser Arbeit nicht betrachtet. Dazu sei auf die Literatur von [TEMPELMEIER 2006, S.31 ff.], [KOGAN ET AL. 2003, S.61 ff.], etc. verwiesen.

Losgrößenverfahren. Sie geben die betriebliche Realität jedoch nur sehr begrenzt wieder. Das liegt vor Allem an den Annahmen, dass

- unterschiedliche Produkte nur unabhängig voneinander betrachtet werden können,
- im EOQ und im SLULSP von unendlicher Produktionsgeschwindigkeit ausgegangen wird,
- im EOQ und EPL von konstanten Bedarfsmengen ausgegangen wird und
- Ausschuss, Unterbrechungen und Rüstzeiten nicht abgebildet werden können.

In der folgenden Tabelle werden die in dieser Arbeit vorgestellten Einproduktmodelle anhand der vorgestellten Kriterien einander gegenübergestellt:¹²

Modell	EOQ	EPL	SLULSP
Planungszeitraum	Stetig, unendlich	Stetig, unendlich	Diskret, endlich
Anzahl betrachteter Produktionsstufen	1	1	1
Anzahl betrachteter Produkte	1	1	1
Kapazitäten	Unbeschränkt	Beschränkt	Unbeschränkt
Lieferverzögerung / Fehlmengen	Nein	Nein	Nein
Zielgrößen	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten
Bedarf	Konstant, statisch	Konstant, statisch	Dynamisch
Rüstkosten	Konstant, pro Los	Konstant, pro Los	Dynamisch, pro Periode
Rüstzeit	Nein	Nein	Nein
Lösungsverfahren	Harris, Aandler	Taft 1918	Wagner-Whitin, Groff, LUC, PPB, Silver-Meal, Losgroessen Saving Verfahren

Abbildung 2-4: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 1/3

EOQ, EPL und SLULSP wurden in Kapitel 2.2 zu den Mehrproduktmodellen erweitert. Sie werden der Praxis insofern gerecht, als dass nicht mehr von unbeschränkten Kapazitäten ausgegangen wird. Das ELSP ist als Weiterentwicklung des EPL Modells das einzige stetige Modell. Es verwendet größtenteils Annahmen des klassischen

¹²Eine Gegenüberstellung aller vorgestellten Verfahren befindet sich im Anhang. Diese Darstellung ist ein Auszug aus der Tabelle im Anhang. Ähnliche Gegenüberstellungen finden sich beispielsweise bei REITNER oder MEYR [Vgl. z.B. REITNER 2007, S.23 ff., MEYR 1999, S. 212 ff.].

Losgrößenmodells mit dem Unterschied, dass mehrere Produkte gemeinsam betrachtet werden. Die Kapazität eines Produktionsprozesses wird indirekt dadurch berücksichtigt, dass jeweils nur ein Produkt gefertigt werden darf.

Alle anderen Modelle unterteilen die Zeitachse in diskrete Planungsperioden. Diese bessere Abbildung der Realität hat zur Folge, dass die Optimierungsprobleme ELSP, CLSP, CSLP, DLSP und PLSP alle NP-Schwer sind. Das heißt, dass sie mit derzeit zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht in einem für die Produktionsplanung geeigneten Zeitraum gelöst werden können (s.o.). Deshalb wird in der Praxis auf heuristische Lösungsverfahren zurückgegriffen, die eine Näherungslösung ermitteln. In Kapitel 2.2 wurden einige der gängigsten Lösungsverfahren bereits kurz vorgestellt.

In Bezug auf das CLSP ist zusätzlich anzumerken, dass das Funktionsprinzip um parallele Maschinen erweitert werden kann. Dabei werden, wie beschrieben, Produktionsmengen pro Periode festgelegt. Die Produktionsreihenfolge, in der die Produkte in einer Periode produziert werden, wird nicht festgelegt. TEMPELMEIER weist darauf hin, dass die in Abschnitt 2.2.3 angegebene Formulierung des CLSP nicht effizient lösbar ist, da der Zielkorridor nicht ausreichend eingeschränkt werden kann, so dass heuristische Verfahren effizient zu einer Lösung führen [TEMPELMEIER 2006, S.201]. Er verweist stattdessen auf die Umwandlung in ein Standortmodell zur effizienten Lösungsermittlung.

Die folgende Abbildung 2-4 fasst die genannten Modelle, deren Annahmen und einen Auszug der Lösungsverfahren zusammen und stellt die Variablen gegenüber. Dazu werden die zu Beginn des Kapitels erarbeiteten Kriterien verwendet.

Modell	ELSP	CLSP, CSLP	DLSP, PLSP
Planungszeitraum	Stetig, unendlich	Diskret, endlich	Diskret, endlich
Anzahl betrachteter Produktionsstufen	1	1	1
Anzahl betrachteter Produkte	n	n	n
Kapazitäten	Beschränkt	Beschränkt	0 oder C
Lieferverzögerung / Fehlmengen	Nein	Nein	Nein
Zielgrößen	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten
Bedarf	Konstant, statisch	Dynamisch	Dynamisch
Rüstkosten	Konstant pro Los	Dynamisch, pro Periode	Dynamisch, pro Los
Rüstzeit	Nein	Nein	Nein
Lösungsverfahren	Bromberger, Park/Youn, Lagrange- Ansatz, Haessler, Dobson	Salomon 1991, Derstroff 1995	Fleischmann, Drexl/Haase

Abbildung 2-5: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 2/3

Abschließend werden in Kapitel 2.2 zwei Modelle vorgestellt, welche die Fragestellung der Losgrößenoptimierung weiter abstrahieren und somit generell als Problem formulieren. Dazu sind die Bedarfsmengen generell als Variabel aufzufassen und die Anzahl der Perioden zu verallgemeinern. Die Verfahren sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt. Alle vorher beschriebenen Modelle können als Spezialfälle dieser Modelle angesehen werden.

Modell	GLSP	MLCSLP
Planungszeitraum	Diskret, endlich	Diskret, endlich
Anzahl betrachteter Produktionsstufen	1	n
Anzahl betrachteter Produkte	n	n
Kapazitäten	Beschränkt	Beschränkt
Lieferverzögerung / Fehlmengen	Nein	Nein
Zielgrößen	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten, sowie variable Produktionskosten
Bedarf	Dynamisch	Dynamisch
Rüstkosten	Dynamisch, pro Periode und Los	Dynamisch, pro Los
Rüstzeit	Ja	Ja
Lösungsverfahren	Fleischmann/ Meyr	Tempelmeier

Abbildung 2-6: Vergleich der vorgestellten Losgrößenmodelle 3/3

TEMPELMEIER diskutiert unterschiedliche Ausprägungen und Lösungen des MLCSLP [TEMPELMEIER 2006, S.198 ff.]. Dort erläutert er außerdem, dass es bei der Anwendung des in der Praxis üblichen MRP-Sukzessivplanungskonzepts zu extremen Schwankungen der Kapazitätsbelastungen kommt und dass es bei Vernachlässigung der Kapazitäten zur Erstellung unzulässiger Produktionspläne kommen kann. [TEMPELMEIER 2006, S.278 f.]

In diesem Kapitel wurde ein historischer Überblick über Losgrößenverfahren gegeben und dabei auf die wesentlichen Meilensteine der Losgrößenermittlung eingegangen. Es lässt sich festhalten, dass die vorgestellten Modelle die Praxis nur mit erheblichen Einschränkungen darstellen. Mit Hinzunahme weiterer Parameter, zur Annäherung an realistische Bedingungen nimmt die Komplexität der Modelle sehr schnell zu. Das ist ein Grund dafür, warum die übergeordnete Bedarfs- und Losgrößenplanung meist zentral von EDV-Systemen, wie beispielsweise ERP-Systemen durchgeführt wird.

Hiermit wird einer der Grundgedanken von *Industrie 4.0* bestätigt: Die größere Vernetztheit und Informationsbereitstellung führt zu stark zunehmender Komplexität [BMWI 2014, S.17 ff.]. Diese kann ab einem gewissen Maße nicht mehr zentral gesteuert werden. Im Sinne der Gedanken von *Industrie 4.0* und des Ansatzes dieser Arbeit ist es erforderlich, dezentrale Einheiten zu schaffen, die durch

Steuerungsmechanismen und -logiken autonome Entscheidungen treffen können. Auf diese Weise kann die Komplexität aufgeteilt und es den Teilsystemen ermöglicht werden, miteinander zu interagieren [GÜNTNER ET AL. 2006, S.151 ff.]. Das Gesamtsystem verfolgt weiterhin eine einheitliche Strategie, jedoch bedarf diese keiner zentralen Steuerung mehr.

Fazit

Der Gültigkeitsbereich der Losgrößenverfahren ist durch die Komplexität der Modellierung und das Lösungsverfahren determiniert, nicht durch wirtschaftliche oder unternehmerische Entscheidungen. Flexibilität wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt oder erwogen. Den vorgestellten Losgrößenverfahren fehlt eine Modellierung, die weitere Einflussgrößen und Umweltfaktoren einbezieht.

Kunden sind ausschließlich durch die Nachfragefunktion repräsentiert. Dies entspricht nicht mehr der aktuellen Vorstellung einer kundenorientierten Unternehmensausrichtung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist es erforderlich, Losgrößenbetrachtungen weiter zu fassen und in den Kontext prozessorientierter Strukturen einzubetten.

3 Prozessorientierung

Die technische Optimierung einzelner Aktivitäten ist ab einem gewissen Punkt nicht mehr hinreichend effizient. HAMMER fordert auf Basis seiner Erfahrungen eine Verlagerung des Fokus hin zur Prozessorientierung: „[...] in short, our problems lie not in the performance of individual tasks and activities, the units of work, but in the processes, how the units fit together into a whole“ [HAMMER 1996, S.6].

Eine prozessorientierte Unternehmensführung hat sich bewährt, um „Unternehmen auf Kundenbedürfnisse auszurichten, sie effizient zu organisieren, zielorientiert zu steuern und laufend zu verbessern“ [SCHMELZER & SESSELMANN 2013, S.718]. In der Praxis sind die Verkürzung der Durchlaufzeiten, Qualitätssteigerungen und Bestandsreduktionen die wichtigsten, quantitativ messbaren Auswirkungen der Einführung prozessorientierter Strukturen [KUHN 2008, S.215 ff.]. Das *Lean Management* greift die Prozessorientierung als wichtigen Grundsatz auf und stellt darüber hinaus eine „Gesamtheit von Denkprinzipien, Methoden und Verfahrensweisen zur effizienten Gestaltung der gesamten Wertschöpfungskette industrieller Güter“ [PFEIFFER & WEISS 1991, S.2] bereit. Diese grundsätzlichen Veränderungen gegenüber der funktionalen Denkweise geben bei der Betrachtung von Wertschöpfungsketten eine neue Perspektive auf Losgrößenentscheidungen und halten dazu an, *optimale* Losgrößen kritisch zu hinterfragen. HAMMER fasst es so zusammen: „Process-centered organizations demand the complete reinvention of the systems and disciplines of management“ [HAMMER 1996, S.xii]. Aus diesem Grund werden die Prozessorientierung und ihre Auswirkungen im Folgenden näher erläutert.

3.1 Grundlagen

Der Begriff *Prozess*, im Sinne der Organisation von betrieblichen Abläufen, wurde bereits in den 1930er Jahren von F. NORDSIECK in seiner Veröffentlichung *Grundlagen der Organisationslehre* verwendet [NORDSIECK 1932, S.77]. Das Wort Prozess stammt vom lateinischen *processus*, (deutsch: Fortschreiten, Fortgang, Verlauf) ab. In der Literatur sind unterschiedliche Auslegungen des Prozessbegriffes zu finden. [BECKER ET AL. 2008, S.6; OSTERLOH & FROST 2006, S.33] So haben sich nach BINNER die

- verrichtungsbezogene Prozessdefinition, die
- transformationsbezogene Prozessdefinition¹³ und die
- Input-/ Output-bezogene Prozessdefinition

etabliert. [BINNER 2005, S.320] In *verrichtungsbezogener Hinsicht* ist ein Prozess eine „zusammengehörende Folge von einzelnen Handlungen oder Aktivitäten, die zu einem

¹³DIN EN ISO 9000: 2005 ff. (Ersatz für DIN EN ISO 8402:1995-08 und 9000:2000-12).

bestimmten Ergebnis führen“ [BINNER 2005, S.321]. Sämtliche Abläufe in einem Unternehmen bilden somit eine Folge von Einzelprozessen, die Kundenanforderungen in Produkte und/oder Dienstleistungen umsetzen. Dabei spielt das Ergebnis in Form des *Kundennutzens* eine zentrale Rolle. DIN EN ISO 9001 definiert einen Prozess aus *transformationsbezogener* Sicht als „eine Tätigkeit oder eine Gruppe von Tätigkeiten, die Ressourcen verwendet und die ausgeführt wird, um die Umwandlung von Eingaben in Ergebnisse zu ermöglichen“ [DIN EN ISO 9001 2005, S.6] (Ergänzend zur Ergebnisorientierung rückt bei dieser Definition die Umwandlung von Ressourcen in Produkte und Dienstleistungen in den Vordergrund. Durch eine *Input-/ Output-bezogene Prozessdefinition* wird ein Prozess zum Kunden des vorgelagerten Prozesses und zum Lieferanten für den nachgelagerten Prozess. [SCHMELZER & SESSELMANN 2010, S.62] Somit entsteht ein Konzept aus unternehmensinternen und -externen *Kunden und Lieferanten* [BINNER 2005, S.31].

Es lässt sich festhalten, dass ein Prozess „eine Struktur ist, deren Elemente [...] durch logische Folgebeziehungen verknüpft sind. [...] Ein Prozess hat ein definiertes Startereignis (Input) und Ergebnis (Output) und dient dazu, einen Wert für Kunden zu schaffen“ [FISCHERMANN 2009, S.12].

GAITANIDES leitet ein *prozessorientiertes Organisationskonzept* aus der Aufbau- und der Ablauforganisation eines Unternehmens ab [GAITANIDES 2006, S.31]. In einer funktionalen Organisationsstruktur werden Mitarbeiter, Rohstoffe, Maschinen, etc. anhand ihrer Aufgabe in Bereiche eingeteilt. Es entstehen Abteilungen wie beispielsweise Fertigung, Planung, Forschung und Entwicklung, etc. Mit dieser Einteilung ist jedoch das Risiko verbunden, dass sich Mitarbeiter¹⁴ stark an der optimalen Erfüllung ihrer Funktion orientieren und dabei die Konsequenzen ihres Handelns für den Gesamterfolg des Unternehmens aus den Augen verlieren. Zudem ist es wahrscheinlich, dass die Erstellung einer Leistung zwischen den einzelnen Funktionsbereichen immer wieder unterbrochen wird und der Kundennutzen nicht immer im Vordergrund steht [PALUPSKI 2002, S.79]. Im Gegensatz dazu zeichnet sich eine prozessorientierte Organisationsstruktur dadurch aus, dass „Arbeitsgänge und Arbeitsfolgen unabhängig von dem aufbauorganisatorischen Kontext“ geplant werden und „Stellen erst auf der Basis integrierter Verrichtungskomplexe zu bilden sind“ [GAITANIDES 2006, S.31]. Dies beschreibt GAITANIDES mit der Maxime: „*Aufbauorganisation folgt Ablauforganisation.*“ [GAITANIDES 2006, S.31] Demnach kann eine prozessorientierte Organisation funktionales Denken und Handeln bei der Untergliederung eines Unternehmens überwinden [JOCHER ET AL. 2010, S.57 ff.].

¹⁴Zur einfacheren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit durchgängig nur die männliche Form verwendet, allerdings sind mit dieser Formulierung weibliche Personen gleichermaßen angesprochen.

Verfolgt wird das Ziel, Unternehmensaktivitäten und Ressourceneinsatz auf den Kundennutzen auszurichten und die Prozesse kontinuierlich zu verbessern.

Geschäftsprozesse greifen die oben beschriebenen Ansätze auf, setzen den Prozessbegriff jedoch in einen größeren unternehmerischen Kontext. Sie bestehen dementsprechend aus der „funktionsübergreifenden Verkettung wertschöpfender Aktivitäten, die die vom Kunden erwartete Leistung erzeugen und deren Ergebnisse strategische Bedeutung für das Unternehmen haben“ [SCHMELZER & SESSELMANN 2004, S.46].¹⁵ Damit beginnt ein Geschäftsprozess in der Regel mit der Bestellung eines externen Kunden und endet mit der Übergabe eines Produktes oder einer Dienstleistung.

3.2 Prozessmanagement

*Prozessmanagement*¹⁶ wird genutzt, um eine prozessorientierte Sichtweise in Unternehmen und Wertschöpfungsketten einzuführen. Dabei übernimmt es eine konstruktivistische¹⁷ Funktion, was bedeutet, dass die Mitarbeiter in die Gestaltung der Prozesse einbezogen werden, um ein gemeinsames Prozessverständnis zu erlangen und die Prozessorientierung in der Unternehmenskultur zu verankern [GAITANIDES 2006, S.19]. Es umfasst die

- Identifikation,
- Gestaltung und Organisation,
- Dokumentation sowie die
- Steuerung und Verbesserung

von Geschäftsprozessen. Damit kann es als „ein integriertes Konzept von Führung, Organisation und Controlling verstanden [werden], das eine zielgerichtete Steuerung der Geschäftsprozesse ermöglicht“ [SCHMELZER & SESSELMANN 2004, S.4]. Das Konzept der Geschäftsprozesse orientiert sich an der Wertschöpfungskette, wobei das übergeordnete Ziel des Prozessmanagements die Kundenzufriedenheit ist [GILLOT 2008, S.25].

Das kann dazu führen, dass bei der Zuweisung von Ressourcen beispielsweise nicht mehr die maximale Auslastung im Vordergrund steht, sondern derjenige Auftrag

¹⁵Es sei erwähnt, dass der Begriff „Geschäftsprozess“ nicht einheitlich definiert ist. In dieser Arbeit wird die praxisorientierte Definition von SCHMELZER und SESSELMANN verwendet. Weitere Definitionen z.B. bei HAMMER [HAMMER & CHAMPY 1993, S.3 ff.].

¹⁶Je nach Fachgebiet und Sichtweise variiert das Verständnis der Begriffe Prozess und Geschäftsprozess. Vgl. z.B. KOCH [KOCH 2011, S.1 ff.]. In dieser Arbeit werden die Begriffe synonym verwendet, da Prozesse ausschließlich im unternehmerischen Umfeld betrachtet werden und Begriffsnuancen für das Gesamtverständnis nicht entscheidend sind. Genauso wird mit den Begriffen Prozessmanagement und Geschäftsprozessmanagement verfahren.

¹⁷Bezeichnet in der Lernpsychologie eine Sichtweise, die das Lernen als einen konstruktiven Prozess auffasst und davon ausgeht, dass eigene Werte, Überzeugungen, Denkmuster und Vorerfahrungen eine entscheidende Rolle spielen.

produziert wird, der in Bezug auf den Fertigungsendtermin am dringendsten ist. Geschäftsprozesse überschreiten bei der Leistungserbringung in der Regel Abteilungsgrenzen, wodurch Schnittstellen einbezogen werden müssen [HAMMER 1996, S.6 ff.]. Um die gewünschte Kundenzufriedenheit erreichen zu können, ist die Integration und Koordination aller beteiligten Prozessschritte über Abteilungsgrenzen hinweg mit dem Fokus auf Kosten, Qualität, Zeit und Flexibilität erforderlich. In diesem Rahmen müssen relevante Prozesse ausgewählt, konzeptionell gestaltet und abgestimmt werden [EBIG & WITT 2009, S.266].

Um die relevanten Geschäftsprozesse eines Unternehmens zu *identifizieren*, empfehlen SCHMELZER und SESSELMANN einen Top-Down Ansatz [SCHMELZER & SESSELMANN 2013, S.139]. Dazu werden die wichtigsten Kunden und Leistungen auf Basis der Unternehmensziele ermittelt. Anschließend müssen die Geschäftsprozesse so gestaltet werden, dass die größtmögliche Kundenzufriedenheit entsteht und die anderen Unternehmensziele mit größtmöglichem Erfolg erreicht werden können. BINNER stellt die Ziele der Prozessorientierung als Kreislauf dar, in dem Kundenzufriedenheit dazu führt, dass Unternehmensziele, wie beispielsweise die Gewinnmaximierung, besser erreicht werden können und umgekehrt eine bessere Erreichung der Unternehmensziele zu mehr Kundenzufriedenheit führen [BINNER 2005, S.1002].

Im Zuge der *Prozessgestaltung und -organisation* ist es zweckmäßig, die Geschäftsprozesse in Teilprozesse und Arbeitsschritte zu unterteilen und sie anschließend einzeln zu betrachten. Bei der Prozessanalyse werden die einzelnen Aktivitäten auf den Kundennutzen ausgerichtet. Dazu werden Nutz-, Stütz-, Blind- und Fehlprozesse unterschieden. Nutzprozesse (Kernprozesse) sind solche Prozesse, deren Aktivitäten einen direkten Beitrag zur Wertschöpfung des Unternehmens leisten und der Erstellung des Produkts oder der Dienstleistung dienen. Den durch einen Kernprozess in Anspruch genommenen Ressourcen steht damit eine direkte Erhöhung des Kundennutzens gegenüber. Beispiele für Kernprozesse sind Entwickeln, Einkaufen, Bearbeiten und Verpacken. Stützprozesse (Supportprozesse) sind aus Kundensicht nicht wertschöpfend, jedoch zur Durchführung eines Kernprozesses zwingend erforderlich [BECKER & KAHN 2005, S.7]. Stützprozesse wie Prüfen, Lagern und Transportieren unterstützen die Kernprozesse und erhöhen den Kundennutzen nur indirekt. Im Vergleich zu Kern- und Stützprozessen sind Blind- und Fehlprozesse ungeplant. Blindprozesse entstehen durch vorgelagerte, ungenügende Nutz- und Stützprozesse. Blindprozesse benötigen zwar Ressourcen, leisten jedoch keinen Beitrag zum Kundennutzen. Beispiele für Blindprozesse sind Rückfragen, Puffern oder das Suchen von Material. Diese sind zu eliminieren. Auch Fehlprozesse entstehen durch vorausgehende, nicht optimale Nutz- und Prüfprozesse. Ausschussproduktion, fehlerhaftes Kommissionieren und Prüfen oder Beschädigen der Ware führen dazu, dass

Mengen- und Terminvereinbarungen nicht eingehalten werden können oder Kernprozesse wiederholt werden müssen. Eine Prozessgestaltung sollte immer „die funktionsorientierte (vertikale) und prozessorientierte (horizontale) Gestaltungssicht berücksichtigen, um auf diese Weise abteilungs- und prozessbezogen die Vorgaben und Ziele umfassend zu erfüllen“ [BINNER 2005, S.317].

Die *Prozessdokumentation* erfolgt in der Regel mit so genannten Prozesskettenplänen. Prozessketten verknüpfen die Vorgänge in Unternehmen ablauflogisch. So müssen beispielsweise alle Teilprozesse durchlaufen werden, um einen Hauptprozess abzuschließen. Zur Darstellung von Prozessketten werden Prozesslandkarten verwendet. Dadurch werden unterschiedliche Sichtweisen auf die einzelnen Vorgänge, Teilabläufe und den Gesamtablauf ermöglicht. Je nach Zielsetzung der Prozessbetrachtung kann ein unterschiedlicher Detaillierungsgrad zweckmäßig sein. Ein Geschäftsprozess auf strategischer Ebene gibt beispielsweise einen Gesamtüberblick über die Hauptprozesse und deren Interaktionen zur Erstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung. Prozessdarstellungen auf operativer Ebene hingegen zeigen detailliert an, welche Schritte durchlaufen werden müssen, um ein Teilziel oder ein Teilprodukt auf dem Weg der gesamten Wertschöpfung zu erreichen. Für eine Prozesskostenrechnung kann beispielsweise eine Unterteilung bis hin zur Aktivitätsebene erforderlich sein.

Zur *Steuerung und Verbesserung* von Geschäftsprozessen ist es wichtig, messbare Größen zur Bewertung der Prozesse festzulegen. SCHMELZER und SESSELMANN weisen darauf hin, dass es „*notwendig ist, der Zielsetzung (Effektivität) eine ebenso hohe Aufmerksamkeit wie der Zielumsetzung (Effizienz) zu schenken*“ [SCHMELZER & SESSELMANN 2013, S.2 f.]. Daraus lassen sich Steuerungs- und Verbesserungsmaßnahmen ableiten und deren Umsetzung bewerten. Konkrete Maßnahmen sind in der Regel prozessspezifisch, als Beispiel kann jedoch die Eliminierung von nicht wertschöpfenden Prozessen – wie beispielsweise dem Suchen von Arbeitshilfsmitteln – genannt werden. Auch Zeitanalyseverfahren, wie REFA oder MTM, sind in diesem Zusammenhang denkbar.

Die Aufgaben des Prozessmanagements bestehen demzufolge in der Steuerung der prozessorientierten Organisationsform sowie deren Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen [NEUMANN ET AL. 2005, S.299]. Darüber hinaus muss eine konsequente Bewertung der Prozessleistung durchgeführt und überprüft werden, ob die Prozesse auch bei veränderten äußeren Bedingungen geeignet sind, einen Beitrag zur Erreichung der Unternehmensziele zu leisten. Hierdurch kann erkannt werden, ob eine kontinuierliche Prozessverbesserung ausreicht oder ob ein Reengineering-Ansatz (Neuorganisation, bzw. Umgestaltung der Prozesse) bevorzugt werden sollte [EBIG & WITT 2009, S.269].

Resümierend kann festgehalten werden, dass Prozessmanagement ein Instrument zur kundenorientierten Unternehmensführung und Steuerung von Wertschöpfungsketten ist. Es definiert ein Zielsystem für die Unternehmensführung, aus dem sich unmittelbar Prinzipien und Maximen für die Ausrichtung der Prozesse und deren Management ableiten. Ein praxisorientiertes Konzept, das sich diese Prinzipien zu Nutze macht, ist das Lean Management,¹⁸ welches im folgenden Kapitel näher betrachtet wird. Darüber hinaus werden in Kapitel 4.1. zwei Modellierungsverfahren vorgestellt, die eine praktische und umfassende Vorgehensweise zur Darstellung und Verbesserung von Prozessen in Unternehmen zur Verfügung stellen.

3.3 Lean Management

Um den Anforderungen der zunehmenden Individualisierung der Märkte gerecht zu werden, hat in den letzten Jahrzehnten ein Umdenken in der Strategie produzierender Unternehmen stattgefunden. ZSIFKOVITS erkennt darin den Trend, dass „*die klassischen Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität und damit Prozess- und Technologiebeherrschung [...] als selbstverständlich vorausgesetzt*“ [ZSIFKOVITS 2012, S.326] werden. Darüber hinaus wird von Unternehmen verlangt, kundenindividuelle Produkte innerhalb kürzester Zeit anzubieten [REICHWALD 2009, S.24 f.; SCHUH ET AL. 2007, S.631]. Dazu sind die herkömmlichen Methoden der Massenfertigung (Taylorismus) nicht mehr geeignet. In den 1990er Jahren stellte die Studie „*The Machine that Changes the World*“ [WOMACK ET AL. 1990, S.20 ff.] heraus, dass bei der *Toyota Motor Company* „ein neues, in wirtschaftlicher Hinsicht allen anderen Ansätzen überlegenes Konzept entwickelt worden war“ [SPATH 2003, S.192]. Lean Management greift den Grundsatz der Prozessorientierung auf und beschreibt ein Konzept, das die Wertschöpfungskette auf den Bedarf der Kunden ausrichtet und dabei Verschwendung von Ressourcen vermeiden soll.

Der Begriff Lean Management geht auf das von TAICHI OHNO in den 1950er Jahren entwickelte *Toyota Production System (TPS)* zurück [OHNO 1988, S.1 ff.]. Ausgelöst durch die Finanzkrise und schwere Kapitalmarktbedingungen nach dem Zweiten Weltkrieg, sowie den Wunsch, innerhalb von kurzer Zeit mit den US-Amerikanischen Konkurrenten gleich zu ziehen, begann OHNO eine Produktion zu entwickeln, bei der das eingesetzte Kapital auf ein Minimum beschränkt wird. OHNO selbst resümiert:

„*There is no magic method. Rather, a total management system is needed that develops human ability to its fullest capacity [...], to utilize facilities and machines well and to eliminate all waste*“ [OHNO 1988, S.9]. Das untermauert die zentrale Rolle, welche die

¹⁸Eine Übersicht, welche Beziehungen zwischen dem Geschäftsprozessmanagement und anderen Managementkonzepten bestehen geben SCHMELZER und SESSELMANN [SCHMELZER & SESSELMANN 2004, S.7 ff.].

Vermeidung von Verschwendung einnimmt. Im Toyota Production System werden sieben Arten von Verschwendung unterschieden [LIKER & MEIER 2006, S.39 ff.]:

1. *Überproduktion*. Werden mehr Produkte gefertigt als vom Kunden nachgefragt, führt dies zu unnötiger Inanspruchnahme von Arbeitsmitteln, Lagerflächen und Mitarbeitern, etc.
2. *Wartezeit/Leerlauf*. Beschreibt die Zeit, in der keine Wertschöpfung stattfindet. Sie kann meist auf falsche Arbeitsorganisation oder Materialengpässe zurückgeführt werden.
3. *Unnötige bzw. zu lange Transportwege*. Der Transport von Materialien, Zwischen- und Fertigprodukten zwischen Prozessen ist nicht wertschöpfend und folglich als Verschwendung einzustufen. Ineffiziente Transportwege sind in der Regel auf schlecht abgestimmte Prozesse zurückzuführen.
4. *Mangelhafte Organisation des Arbeitsprozesses*. Durch eine ineffiziente Organisation des Arbeitsplatzes werden zusätzliche Prozessschritte erforderlich, die vom Kunden nicht honoriert werden. Dies kann sowohl durch eine schlechte Ausführung des Prozesses, als auch durch falsche Planung des Arbeitsbereichs entstehen.
5. *Bestände*. Überdimensionierte Lagermengen (unabhängig von der Wertschöpfungsstufe) führen zu höheren Durchlaufzeiten, Transport und Lagerkosten. Außerdem täuschen sie über Probleme, wie beispielsweise schlecht aufeinander abgestimmte Prozesse, hinweg, weil es trotz vorhandener Probleme zu unverzüglichen Lieferungen kommt.
6. *Überflüssige Bewegungen*. Unnötige zusätzliche Bewegungen bei der Prozessdurchführung, wie beispielsweise Suchen, Holen oder Auffüllen die innerhalb eines Prozesses entstehen, sind Verschwendung.
7. *Fehler*. Die Produktion von Ausschuss führt zu Nacharbeit an den Produkten oder zu Entsorgung und Neuproduktion. Es werden also Zeit und Energie verschwendet.

Das so genannte *Pull Prinzip* sorgt dafür, dass nur tatsächlich (vom Kunden) nachgefragte Mengen produziert werden. Ein Prozess wird nur ausgelöst, wenn ein tatsächlicher Bedarf vorhanden ist. Somit werden die Teilprozesse synchronisiert und auf das fertige Produkt ausgerichtet. [TAKEDA 2012, S.177 ff] Der Informationsfluss erfolgt rückwärts, von nachgelagerten zu vorgelagerten Prozessen, durch das Weitermelden von Bedarf. Bildlich kann man sich die Verfahrensweise als einen vom Kunden aus rückwärts durch das Unternehmen gezogenen Materialfluss vorstellen. Durch die Anwendung des *Pull Prinzip* und die Vermeidung der sieben Verschwendungsarten verfolgt das Toyota Production System eine *kunden- und prozessorientierte Unternehmensausrichtung*. So werden nur die vom Kunden nachgefragten Güter auf die bestmögliche Art und Weise produziert.

Diese Sichtweise des TPS ist jedoch stark produktionsseitig geprägt und auf ein einzelnes Unternehmen beschränkt. In der Weiterentwicklung der Lean Production zum Lean Management definieren WOMACK und JONES deshalb das Prinzip der Verschwendungsvermeidung in einem größeren Kontext [WOMACK & JONES 2004 S.23 ff.]. Dazu verwenden sie die fünf Prinzipien [WOMACK & JONES 1996, S.15 ff.]

- Wert aus Kundensicht spezifizieren,
- Wertstrom identifizieren,
- Flussprinzip einführen,
- Pull Prinzip etablieren und
- Perfektion anstreben,

mit denen es möglich ist, die Verschwendungsvermeidung auf unternehmensübergreifende Wertschöpfungsketten auszuweiten. Im ersten Schritt wird herausgearbeitet, für welche Leistungen ein Kunde tatsächlich bereit ist, Geld zu bezahlen. Das beschriebene Konzept der Kundenorientierung nimmt damit die zentrale Rolle im Lean Management ein. [PFEIFFER & WEISS 1994, S.125 f.]

Einen *Wertstrom* definieren ROTHER und SHOOK als „*all the actions (both value added and non-value added) currently required to bring a product through the main flows essential to every product: (1) the production flow from raw material into the arms of the customer, and (2) the design flow from concept to launch*” [ROTH & SHOOK 2006, S.3]. Mit Hilfe der sogenannten Wertstrommethode kann ein Wertstrom dargestellt und analysiert werden. Die Darstellung hilft dabei, Verschwendung sichtbar zu machen und die Prozessschritte so aufeinander abzustimmen, dass nach Möglichkeit ein Flussprinzip eingeführt werden kann. Um sicherzustellen, dass nur von den Kunden tatsächlich nachgefragte Mengen produziert werden, wird das oben beschriebene *Pull Prinzip* eingeführt. Mit der kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse im Zuge der Anwendung der fünf Prinzipien des Lean Managements wird *Perfektion* angestrebt. Darunter wird verstanden, dass der Kunde den von ihm gewünschten Wert passgenau in kürzester Zeit erhält [WOMACK & JONES 2004, S.25 f.].

Fazit

Die aus der Praxis abgeleiteten Prinzipien der Lean Production wurden mittlerweile zu einer unternehmensübergreifenden Strategie, einer grundlegenden Supply Chain-Ausrichtung ausgeweitet. Kern dieses Lean Thinking sind die Kunden- und die Prozessorientierung. Diese Sichtweise hat das Management von Unternehmen und Wertschöpfungsketten in den letzten Jahrzehnten maßgeblich beeinflusst, was auch Auswirkungen auf Losgrößenentscheidungen hat.

3.4 Auswirkungen der Prozessorientierung auf Losgrößenentscheidungen

Um die Organisation kunden- und prozessorientiert auszurichten, bedient sich das Lean Management einiger Produktionssteuerungsverfahren, die Einfluss auf Losgrößenentscheidungen nehmen, bzw. optimale Losgrößen unmittelbar vorgeben.

Produktionssteuerungsverfahren können anhand ihrer Anwendbarkeit auf die *Fertigungsform* und die *Fertigungsart* unterschieden werden. WIENDAHL teilt Fertigungsverfahren anhand ihrer räumlichen Struktur in Werkstättenprinzip, Fließprinzip, Insel-/ Gruppenprinzip, Baustellenprinzip und Werkbankprinzip ein. [WIENDAHL ET AL. 2014, S.275 f.] Dies wird auch als Fertigungsform bezeichnet. SCHOMBURG hingegen unterteilt Produktionsverfahren (unter Anderem) in Bezug auf die Losgröße und Wiederholhäufigkeit der von ihnen zu fertigenden Produkte. Diesbezüglich unterscheidet er Einzelfertigung, Kleinserienfertigung, Serienfertigung und Massenfertigung [SCHOMBURG 1980, S.30 ff.]. Bei einer Einzelfertigung wird eine einzige Einheit eines Produktes hergestellt, das sich von allen anderen zu fertigenden Produkten unterscheidet. Folglich stellt sich die Frage der Losgröße in diesem Fall nicht. Dies ist nicht mit der Forderung nach Losgröße 1 gemeint, die zuletzt häufig in der Literatur angeführt wird [DICKMANN 2009, S.18 ff.; BECKER 2005, S.123 f.] und mit der sich das folgende Kapitel beschäftigt.

3.4.1 One Piece Flow

Die Art des Teileflusses hat großen Einfluss auf die Durchlaufzeiten vom Rohmaterial bis zum Fertigprodukt und die Bestände eines Unternehmens. LÖDDING nennt vier Gründe, warum auf eine Chargenfertigung verzichtet werden sollte: [LÖDDING 2008, S.102 f.]

1. *Sammelzeiten.* Es muss so lange gewartet werden, bis eine vollständige Charge produziert werden kann.
2. *Vorbereitungszeiten.* Vorbereiten aller Werkstücke auf die Bearbeitung.
3. *Parallelbearbeitung.* Werden mehrere Aufträge zu einer Charge zusammengefasst, ist es schwieriger, (es werden mehr Aufträge benötigt um) einen Prozessschritt auszulasten.
4. *Belastungsspitzen an nachgelagerten Prozessen.* Da mehrere Aufträge zur gleichen Zeit fertig gestellt werden, ist es sehr wahrscheinlich, dass nachgelagerte Prozesse ungleichmäßig ausgelastet werden.

In ihrem Buch *Learning to See* beschreiben ROTHER und SHOOK die Leitlinie des Lean Managements mit „*develop continuous flow wherever possible*“ [ROTH & SHOOK 2003, S.54]. Demzufolge ist immer ein *one piece flow* zu realisieren, wenn das

technisch und organisatorisch möglich ist. Der *one piece flow* beschreibt die direkte Weitergabe eines Werkstückes nach seiner Bearbeitung an den nachgelagerten Prozess. Gemäß dem Gedanken der Prozessorientierung verkürzen sich die Wartezeiten zwischen den einzelnen Arbeitsschritten und die Verschwendung – im Sinne des Lean Managements – wird verringert. So wird eine Synchronisation der Fertigung angestrebt und eine Verkürzung der Herstellzeit ermöglicht.

Tritt bei der Herstellung im *one piece flow* ein Problem auf, welches einen Prozessschritt stoppt, so erfolgt unweigerlich ein Produktionsstopp der vorgelagerten Prozesse. Somit ist „wenn die Produktion unterbrochen [wird] jeder gezwungen, das Problem sofort zu lösen“. [LIKER & MEIER 2006, S.135] Charakteristisch ist außerdem, dass im Zuge eines *one piece flow* meist die Mehrmaschinenbedienung durch einen Mitarbeiter angestrebt wird. Im Gegensatz zu einer konventionellen Arbeitsorganisation verbleibt ein Mitarbeiter dabei nicht an einer Maschine oder seinem Arbeitsplatz, sondern führt Arbeiten an einem Produkt über mehrere Produktionsstufen durch – und damit mit wechselnden Arbeitsroutinen und gegebenenfalls an unterschiedlichen Orten. LÖDDING weist darauf hin, dass es organisatorisch innerhalb jeder Fertigungsform möglich ist, einen *one piece flow* zu realisieren. Es wäre demzufolge auch möglich, innerhalb einer Werkstättenfertigung oder Inselfertigung punktuell Strecken mit Losgröße Eins einzuführen [LÖDDING 2008, S.99]. Im Regelfall werden jedoch einzelne Bereiche auch strukturell verändert, um ein Flussprinzip zu realisieren.¹⁹

Auf den ersten Blick scheint dies ein gravierender Eingriff in die Losgrößenentscheidung zu sein. Es ist jedoch möglich, ein Fertigungslos vor einer *one piece flow*-Strecke zu vereinzeln und anschließend wieder zu komplettieren. Damit steht ein *one piece flow* der losweisen Fertigung nicht diametral entgegen. Vielmehr werden ganze Strecken, auf denen ein *one piece flow* implementiert ist als ein Prozessschritt aufgefasst, für den dann (geschlossen) Losgrößenentscheidungen getroffen werden. Erfordern die Prozesse auf einer *one piece flow* Strecke im Falle eines Produktwechsels alle Umrüstschritte, so ist es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll, Produkte eines Typs zu einer Charge (Produktionsfolge) zusammenzufassen.

Ist eine Produktion nicht in der Lage, die Kundennachfrage in ausreichender Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit zu bedienen, ist der *one piece flow* nicht anwendbar. Außerdem gibt es Prozesse, die räumlich zu weit entfernt ablaufen (beispielsweise in anderen Werken), so dass eine Prozessverknüpfung nach dem Flussprinzip nicht möglich ist. [ROTHER & SHOOK 2006, S.42] Ein weiterer Grund auf das Flussprinzip zu verzichten, ist eine kundenanonyme Vorproduktion. Hier werden Standardkomponenten vorproduziert, ohne dass es einen konkreten Kundenbedarf gibt.

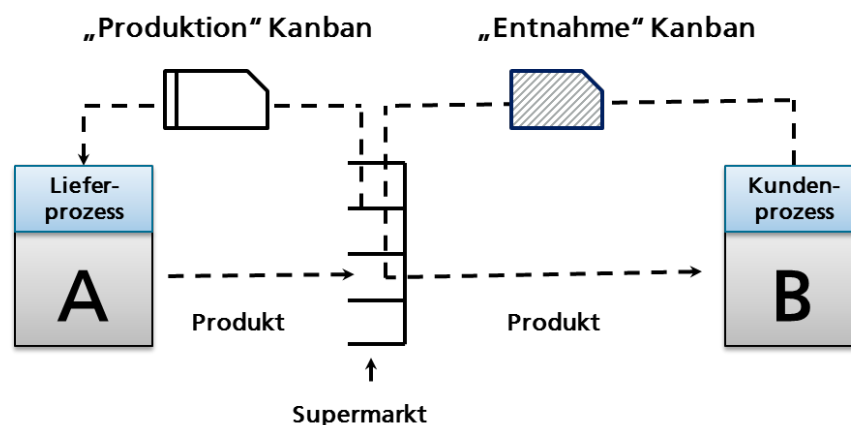
¹⁹ Zur weiterführenden Diskussion struktureller Einteilungen, insbesondere der Segmentierung, bzw. Modularisierung siehe z. B. WILDEMAN [WILDEMAN 2007, S.13 ff.].

Im Bedarfsfall werden die Komponenten dann individuell angepasst, oder zu den konkret nachgefragten Produkten zusammengesetzt. Damit wird versucht, schnell und flexibel auf Kundenwünsche zu reagieren.

3.4.2 Kanban Steuerung

Eine *Kanban*²⁰ Steuerung ist eine Methodik zur Implementierung des in Kapitel 3.2 vorgestellten *Pull-Prinzips*. [WOMACK & JONES 2004, S.407] Beim Funktionsprinzip der Kanban Steuerung ließ sich TAICHI OHNO durch amerikanische Supermärkte inspirieren. [OHNO 1988, S.25] Ähnlich wie bei einem konventionellen Supermarkt werden alle Fertigprodukte eines Prozesses in einem Regal, dem *Supermarkt-Lager*, im Folgenden kurz *Supermarkt* genannt, gelagert. Entnimmt der Kunde des Prozesses ein Fertigprodukt aus diesem Supermarkt, so wird das bemerkt und dadurch eine Nachlieferung ausgelöst.

Supermarkt-Pull-System



1. **Kundenprozess** entnimmt dem Supermarkt was er braucht, wenn er es braucht.
2. **Lieferprozess produziert**, um das Entnommene wieder aufzufüllen.

Zweck: Steuerung der Produktion am Lieferprozess ohne Produktionsplan, Steuerung der Produktion zwischen den Flüssen

Abbildung 3-1: Zwei-Karten Kanban-System mit Produktionssupermarkt
[ROTHER & SHOOK 2006, S.42]

Abbildung 3-1 zeigt das Funktionsprinzip einer Kanban Steuerung schematisch. Der Kundenprozess B entnimmt aus dem zwischen den Prozessen stilisiert dargestellten Supermarkt Produkte in der benötigten Reihenfolge und Menge. Dabei gilt das einfache Prinzip: Der Kundenprozess bekommt was er braucht, wann er es braucht. Zwischen zwei, durch eine Kanban-Steuerung miteinander verbundenen Prozessen entsteht so eine eindeutige Kunden- und Lieferantenbeziehung.

²⁰Kanban ist das japanische Wort für Karte.

Der Supermarkt ist zum Lieferprozess L hin geöffnet, was darauf hinweist, dass der Lieferprozess für einen ausreichenden Bestand im Supermarkt verantwortlich ist. Wird ein Produkt entnommen, so informiert ein *Produktions-Kanban* den Lieferprozess über den Verbrauch, so dass die Nachproduktion ausgelöst wird.

Durch Weitergabe der Kanban Karte informiert der Mitarbeiter des Kundenprozesses den des vorgelagerten Prozesses darüber, wie viele Produkte verbraucht wurden. Deshalb muss die Karte sämtliche für die Nachproduktion und den Transport erforderlichen Informationen enthalten [BECKER 2006, S.294]. Wichtige Informationen sind beispielsweise die Artikelnummer des Kanban-Produktes, die Füllmenge des Transportbehälters, die Bezeichnung des Kundenprozesses, die Bezeichnung des Lieferprozesses, die Nummer der Kanban-Karte, etc. Können die benötigten Informationen anderweitig übermittelt werden, sind Karten für ein Kanban Steuerungskonzept nicht zwingend erforderlich. So sind beispielsweise ein Behälter-Kanban, elektronisches Kanban oder ein Sicht- Kanban möglich. [LÖDDING 2008, S.183 ff.] In den meisten Fällen wird jedoch wenigstens zu Beginn der Implementierung einer Kanban-Steuerung mit Karten gearbeitet.

Das wesentliche Merkmal der Kanban Steuerung ist, dass nur tatsächlich verbrauchte Mengen nachgeliefert, bzw. produziert werden. TAIICHI OHNO kommentiert „*in the TPS overproduction is completely prevented by Kanban*“. [OHNO 1988, S.29] Wird davon ausgegangen, dass die Supermarktbestände definitiv abgenommen werden, stimmt das.

Meist ist es jedoch nicht so, dass der Verbrauch eines einzelnen Produkts, sondern der Verbrauch eines Gebindes eine Nachbestellung ausgelöst. Eine Kanban Karte bezieht sich daher meist auf ein Gebinde (in der Regel einen Transportbehälter), an dem sie angebracht wird. Daraus resultiert eine Kanban- Losgröße, die häufig gleich der Verpackungsmenge eines Produkts gewählt wird. Werden Prozesse durch eine Kanban Steuerung miteinander verknüpft, gibt es Regeln, die eingehalten werden müssen, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Die folgende Übersicht zeigt auf der linken Seite jeweils die Regel und auf der rechten Seite die Funktionen der Kanban-Karten: [OHNO 1988, S.30]

- | | |
|--|--|
| 1. Der Kundenprozess entnimmt die durch eine Kanban-Karte festgelegte Anzahl Werkstücke. | 1. Kanban-Karte übermittelt die Entnahme- oder Transportinformation |
| 2. Der vorgelagerte Arbeitsgang stellt Teile nur in der durch die Kanban-Karten vorgegebenen Losgröße und Reihenfolge her. | 2. Kanban-Karten liefern Informationen zur Produktionsmengen- und Reihenfolgeplanung |
| 3. Ohne Vorliegen einer Kanban- | 3. Verschwendung in Form von |

- | | |
|--|---|
| <p>Karte darf nicht produziert oder transportiert werden.</p> <p>4. Alle Güter im Steuerungskreis müssen mit Kanban-Karten versehen werden.</p> <p>5. Fehlerhafte Teile dürfen nicht an den Folgeprozess weitergegeben werden.</p> <p>6. Durch eine Verringerung der Menge von Kanban-Karten wird die Sensibilität erhöht.</p> | <p>Überproduktion und unnötigem Transport wird vermieden.</p> <p>4. Kanban-Karte dient als Arbeitsauftrag und Informationsträger.</p> <p>5. Fehler werden nach dem Verursacherprinzip sichtbar, die Endprodukte eines Prozesses sind fehlerfrei.</p> <p>6. Kanban-Karten führen zu Bestandstransparenz und ermöglichen Bestandskontrolle.</p> |
|--|---|

ERLACH weist zusätzlich darauf hin, dass die Anzahl der im Umlauf befindlichen Kanban Karten regelmäßig überprüft werden muss [ERLACH 2010, S.197]. Dadurch werden Probleme sichtbar und Bestandstransparenz entsteht. Sammeln sich beispielsweise Kanban Karten vor einem Produktionsprozess an, oder wird die Bestandsuntergrenze eines Supermarktfachs unterschritten, so reicht die Geschwindigkeit des Lieferprozesses nicht aus. Anders als beim *one piece flow* stockt die Produktion jedoch nicht sofort, wenn ein geliefertes Produkt fehlerhaft ist oder noch nicht ausgeliefert ist, da wenigstens ein Los des Fertigproduktes im Supermarkt verfügbar ist.

Um die Anzahl der im Umlauf befindlichen Kanban zu bestimmen (Dimensionierung des Kanban-Systems), schlägt ERLACH ein praktisches „Ausprobieren“ vor [ERLACH 2010, S.196]. Auf Basis der Verbrauchsmengen des Kundenprozesses wird die Lagermenge im Supermarkt so gewählt, dass dieser nie lieferunfähig wird. Dazu kann zunächst ein höherer Bestand verwendet werden, der im Folgenden schrittweise (Kanban für Kanban) reduziert wird. Anschließend kann für die Berechnung der Anzahl der Kanban Karten pro Variante der maximale Supermarktbestand herangezogen werden. Teilt man diesen durch die Kanban Losgröße (Gebindemenge) erhält man die Anzahl der erforderlichen Kanban Karten.

ERLACH leitet die Reichweite R_S eines Supermarktes her, indem er den Lagerbestand auf den täglichen Kundenbedarf y_{Tag} bezieht: [ERLACH 2010, S.195]

$$R_S = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \#K_i q_i}{\#T y_{Tag}}$$

R_S Reichweite des Supermarkts [ZE]

$\#K$ Anzahl der Kanban-Karten im Steuerungskreis [Stk.]

q Losgröße [Stk.]

#T Anzahl der Gleichteile pro Produkt [Stk.]

y_{Tag} Bedarfsmenge pro Tag [Stk.]

Dabei wird davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Lagerbestand der Hälfte des maximalen Lagerbestands entspricht. Es können produktweise unterschiedlich große Mengen im Supermarkt vorgehalten werden, wozu jeweils die Anzahl der Kanban Karten entsprechend angepasst werden muss. Auf diese Weise können Bedarfsschwankungen in durch einen Sicherheitsbestand in einem gewissen Rahmen abgedeckt werden [GÜNTNER ET AL. 2013, S.82 f.].

Die bisher vorgestellten Gesetzmäßigkeiten dienen dem grundsätzlichen Verständnis der Steuerungslogik in Kanban Systemen und liegen jeder Kanban Steuerung zugrunde. In der Praxis haben sich unterschiedliche Formen von Kanban Steuerungen etabliert. ERLACH unterscheidet anhand des Anwendungsbereiches drei Gruppen: [ERLACH 2010, S.192]

- Werden zwei Produktionsprozesse durch einen Supermarkt entkoppelt, sollte die Losgröße des Lieferprozesses so ausgelegt werden, dass sie der Verbrauchsmenge des folgenden Prozesses entspricht. Diese Beziehung wird als *Produktions-Kanban* bezeichnet.
- Weichen die Rüstzeiten zweier aufeinanderfolgender Prozesse stark voneinander ab, kann eine Kanban-Steuerung so ausgelegt werden, dass sie einen Losgrößenwechsel zwischen den Prozessen ermöglicht. Diese Steuerung wird als *Signal-Kanban* bezeichnet.
- Außerdem können Beschaffungsvorgänge bei externen Lieferanten und Dienstleistern durch Kanban-Systeme gesteuert werden, dies bezeichnet man als *Lieferanten-Kanban*.

In den bisherigen Beschreibungen hat der Lieferprozess die Losgröße bereitgestellt, die der Kundenprozess benötigt hat. Beim *Signal-Kanban* wird dieses Prinzip so geändert, dass ein Prozess erst dann angestoßen wird, wenn eine bestimmte Anzahl Kanban Karten vorliegt. Damit wird die Losgröße auf ein ganzzahliges Vielfaches der Kanban Losgröße erhöht. Oftmals wird beim Signal Kanban eine sogenannte *Kanban-Tafel* verwendet, an der die einzelnen Karten gesammelt werden, bis ein Los vollständig ist. Aufgrund der verschwendungsarmen und einfachen Vorgehensweise ist eine Kanban Steuerung auch im Bereich der Beschaffung denkbar. Dabei sind jedoch die Planbarkeit der Verbräuche und die Zuverlässigkeit der Lieferanten ausschlaggebend.

Für den Kontext dieser Arbeit ist wichtig, dass eine Kanban-Steuerung Losgrößen aus Produktionssicht definiert. Sie legt nicht nur die Losgröße fest, sondern auch die Produktionsreihenfolge. Aus dieser Sichtweise heraus werden aber auch Transportprozesse und Transportlosgrößen definiert. Die Kanban Losgröße hat nichts mit einer wirtschaftlichen Losgrößenberechnung zu tun, wie in Kapitel 2 dieser Arbeit

dargestellt. Sie resultiert vielmehr aus einer pragmatischen Sicht, die sich an der einfachen Handhabung orientiert. Die Frage, wie viele Lose des gleichen Produkts hintereinander produziert werden, stellt sich nicht, weil die Steuerungslogik alleinig die Nachfrage des Kundenprozesses abbildet.

3.4.3 Every Part Every Interval (EPEI)

Der Begriff *Every Part Every Interval* wurde von ROTHER und SHOOK geprägt [ROTHER & SHOOK 2006, S.50]. Sie verwenden den EPEI Wert um zu zeigen, wie flexibel ein Prozess auf seine Kundennachfrage reagieren kann. Dem liegt die Logik zugrunde, dass „*by shortening changeover times and running smaller batches in the upstream fabrication processes, those processes will be able to respond to changing downstream needs more quickly*“ [ROTHER & SHOOK 2003, S.68].

Die folgende Darstellung zeigt die verfügbare zeitliche Kapazität eines Prozesses in Form eines Balkendiagrammes (auf der linken Seite). Die *Technische Verfügbarkeit* gibt dabei in Anlehnung an VDI 3423 den Zeitanteil an, in dem ein Prozess ohne technische Mängel für die Produktion zur Verfügung steht [VDI 3423, S.8]. Geplante und ungeplante Reduzierungen der zeitlichen Kapazität werden in die Ermittlung des EPEI Wertes einbezogen.

Auf der rechten Seite des Diagramms werden der zeitlichen Kapazität die Rüst- und Bearbeitungszeiten in Form eines Produktionsrades gegenübergestellt. Ein Produktionsrad²¹ stellt die Produktionsreihenfolge in Form eines Kreisdiagramms dar. Das Produktspektrum wird dann immer wieder in der Reihenfolge der Drehrichtung des Produktionsrads abgearbeitet. Dazu ist es sinnvoll, die Umrüstreihenfolge so vorzugeben, dass der Aufwand minimal wird. Dies kann in einem separaten Verfahren durchgeführt werden. Es handelt sich um ein Sukzessiv Planungskonzept (vgl. Kapitel 2). Die Reihenfolge- und Losgrößenplanung laufen in voneinander getrennten Planungsschritten ab.

²¹Das Produktionsrad wird in der Literatur auch Rhythm Wheel oder Product Wheel genannt.

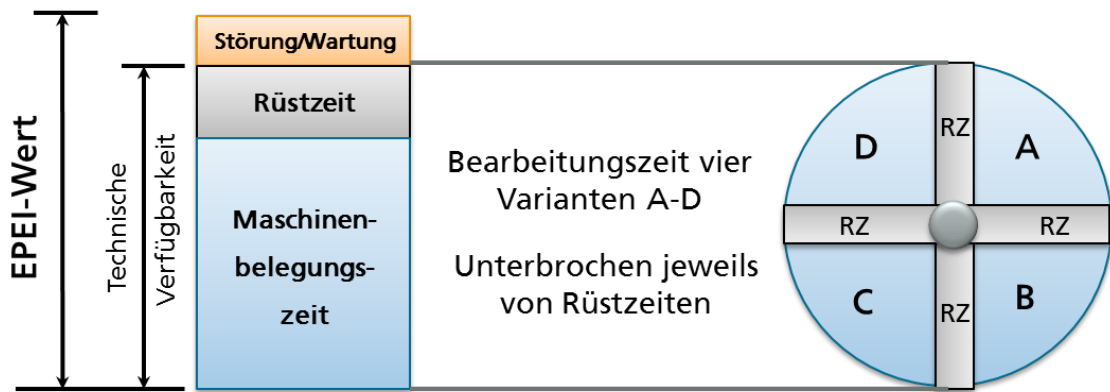


Abbildung 3-2: EPEI-Berechnung (Schematisch) [ERLACH 2010, S.73]

Die Größe eines Segments auf dem Produktionsrad steht für die anteilig für die Produktion eines Produktes erforderliche Zeit. Die Rüst- und Bearbeitungszeiten sind in der Darstellung für alle Produkte gleich groß dargestellt. Je nach Anwendungsfall variieren sie jedoch, woraus dann unterschiedlich große Kreisabschnitte entstehen. Eine solche Darstellung eignet sich für eine Produktion mit einem hohen Wiederholungsgrad der zu produzierenden Produkte. In diesem Fall kann das Produktionsrad auch zur Produktionsplanung verwendet werden, da es die Produktionsreihenfolge und Mengen eindeutig vorgibt. Zur Ermittlung des EPEI Werts werden die Bearbeitungs- und Rüstzeiten aller Produkte aufsummiert und in Bezug zur verfügbaren Arbeitszeit auf den vorhandenen Ressourcen gesetzt [ERLACH 2010 S.73 ff.]:

$$EPEI = \frac{\sum_{i=1}^n t_B + \sum_{i=1}^n t_R}{\#R * V * AZ_d}$$

t_B	Bearbeitungszeit pro Variante [ZE]
t_R	Rüstzeit pro Variante [ZE]
$\#R$	Anzahl der Ressourcen [Stk.]
V	Verfügbarkeit [%]
AZ_d	Tägliche Arbeitszeit [ZE]

Der EPEI Wert gibt an, wie viel Zeit ein Prozessschritt benötigt, um alle Produktvarianten in den vorgegebenen Losgrößen einmal zu produzieren. Bezogen auf die Darstellung gibt der EPEI an, wie lange es dauert, das Produktionsrad einmal komplett zu durchlaufen. Der Every Part Every Interval Wert wird demzufolge auch als eine Messgröße für die Variantenflexibilität eines Produktionsprozesses angesehen. ERLACH leitet ein Verfahren her, indem er auf Basis des EPEI Wertes eine Losgrößenbestimmung für eine Signal- Kanban Steuerung vornimmt. Darauf wird in Kapitel 4.2.2 näher eingegangen.

3.4.4 Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung

PETER NYHUIS stellt in seiner Dissertation aus dem Jahre 1991 ein Verfahren vor, das auf dem klassischen Losgrößenmodell basiert. Es greift die Theorie und die Nebenbedingungen des in Kapitel 2.1 beschriebenen Modells von HARRIS auf, die Kapitalbindungskosten werden jedoch im Auftragsdurchlauf detaillierter betrachtet. [NYHUIS 1991, S.2 ff.] Im Zuge dessen werden die Kosten der Bestände während der einzelnen Produktions- und Pufferstufen (bei NYHUIS auch *Übergangszeit* genannt) einbezogen. Das Kostenoptimum definiert NYHUIS – analog zu den klassischen Modellen – an der Schnittstelle von Rüstkosten- (allgemeiner: Auftragswechselkosten-) und Lagerkostenfunktion. Dabei wird die Lagerkostenfunktion um die Fertigungsbestandskosten in der Durchführungs- und der Übergangszeit erweitert. In der folgenden Abbildung 3-3 ist diese Berechnungslogik grafisch dargestellt. Auf diese Weise verfolgt NYHUIS das Ziel, einen möglichst günstigen Auftragsdurchlauf der einzelnen Produkte zu gewährleisten und somit die Wartezeiten zwischen den Prozessen zu verringern. [NYHUIS 1991, S.8]

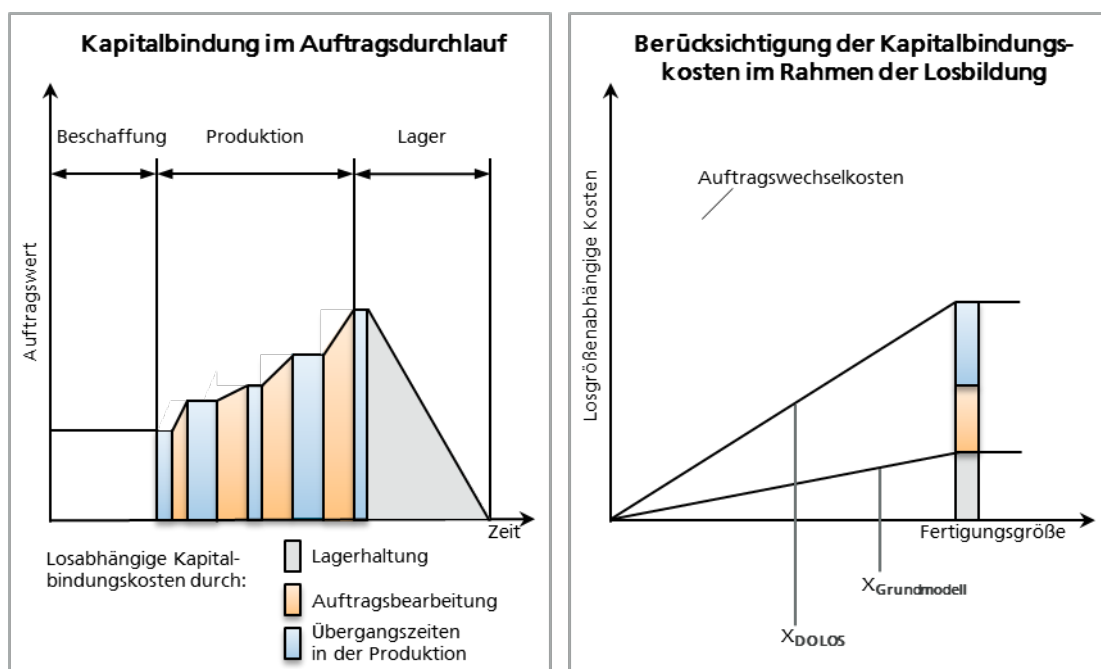


Abbildung 3-3: Kapitalbindung im Auftragsdurchlauf und deren Berücksichtigung bei der durchlauforientierten Losgrößenermittlung
[NYHUIS 1991, S.62, 104]

Auf der rechten Seite ist die qualitative Änderung der durchlauforientierten Losgrößenbestimmung im Vergleich zu den klassischen Modellen dargestellt. Durch die differenziertere Betrachtung erhöhen sich die Lagermengen. Folglich steigt die Lagerkostenfunktion im Vergleich zum klassischen Modell stärker an. Der Schnittpunkt der Rüst- und Lagerkostenfunktion verschiebt sich hin zu kleineren Losgrößen.

Auf der linken Seite ist die Kapitalbindung im Auftragsdurchlauf dargestellt. Sie zeigt exemplarisch, wie Bestände im Auftragsdurchlauf entstehen können und liefert damit die Gründe für das stärkere Ansteigen der Lagerkostenfunktion im rechten Bild. Die Zielfunktion gibt NYHUIS als Summe aus den Auftragswechselkosten K_R , den Lagerhaltungskosten K_L , den Fertigungsbestandskosten während der Durchführungszeit KFB_D und den Fertigungsbestandskosten in der Übergangszeit KFB_U an: [NYHUIS 1991, S.103]

$$K(x) = \frac{d}{x} \sum_{i=1}^n K_R + \frac{psx}{200} + \frac{(s+s_0)pd}{200UZ} \sum_{i=1}^n Z_{DFi} + \frac{(s+s_0)pd}{200UZ} \sum_{i=1}^n Z_{Üi}$$

Es fällt auf, dass die Zielfunktion zusätzlich um die Produkte des Auftragsdurchlaufs $i = 1, \dots, n$ erweitert wurde. Durch Differenzieren und Nullsetzen erhält man die optimale durchlauforientierte Losgröße:

$$X_{DOLoS} = \sqrt{\frac{200d \sum_{i=1}^n K_R}{ps + \frac{(s+s_0) p m FG}{60 UZ} \sum_{i=1}^n \frac{t_{e,i}}{KAP}}}$$

Im Vergleich zu den klassischen Losgrößenverfahren greift diese Optimierung das Flussprinzip der Prozessorientierung auf. Ähnlich wie bei den klassischen Verfahren kann die Losgrößenoptimierung durch mehrfaches Anwenden auf weitere Fertigungsstufen erweitert werden.

Um einem prozessorientierten Ansatz über mehrere Prozessschritte hinweg zu verfolgen, sind darüber hinaus weitere Abstimmungen zwischen den Prozessschritten erforderlich. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die durchlauforientierte Losgrößenermittlung ebenfalls ein statisches Verfahren ist, welches von unendlichen Lager- und Produktionskapazitäten ausgeht. Kapazitätsrestriktionen werden dabei nicht einbezogen. Außerdem beschränkt sich das Verfahren auf eine einstufige Fertigung.

3.4.5 Weitere Verfahren

In der Literatur werden weitere prozessorientierte Produktionssteuerungsverfahren diskutiert [HELLINGRATH 2002, S.40 ff.]. Diese greifen auf ähnliche Methodiken wie die vorgestellten Modelle zurück. Insbesondere sind das *Constant Work in Progress Verfahren*, und die kombinierte *Kanban-ConWip* Steuerung zu nennen. Der Begriff *ConWiP* bedeutet *Constant Work in Progress*. Die damit gemeinte Steuerungslogik geht auf Veröffentlichungen von SPEARMAN und HOPP aus den 90er Jahren zurück [Vgl. z. B. SPEARMAN & HOPP 1989, S.147 ff.]. Ihr Verfahren bedient sich einer Fertigungssteuerung, bei der die Bestandsobergrenze eines Teilproduktes über einen Zeitraum festgelegt wird.

$$\text{ConWiP} = \frac{(BZ * GM) + TZ}{KT}$$

ConWiP	Bestandsobergrenze [Stck.]
BZ	Bearbeitungszeit des vorgelagerten Prozesses [ZE]
GM	Gebindemenge beim Transport [Stck.]
TZ	Transportzeit [ZE]
KT	Kudentakt [ZE]

Im Gegensatz zu einer Kanban Steuerung erfolgt die ConWiP-Steuerung zentral. Zur Losgrößenentscheidung wird im ConWiP-Verfahren auf die Gebindemenge zurückgegriffen. Damit hat die Steuerungslogik Einfluss auf die innerbetrieblichen Materialflüsse und legt auch Maximalwerte für die Anzahl der Lose in einem Produktionsbereich fest. Eine Losgrößenoptimierung erfolgt jedoch nicht.

BONVIK, COUCH und GERSHWIN stellen in ihrer Veröffentlichung *A Comparison of Production-Line Control Mechanisms* eine Kombination aus der Kanban- und der ConWiP-Steuerung vor [BONVIK ET AL. 1997, S.789 ff.]. Das System funktioniert ebenfalls kartenbasiert, wobei der Kartenkreislauf auf ein gesamtes Teilsystem der Fertigung bezogen wird. Es entsteht ein System aus mehreren aufeinanderfolgenden Prozessschritten, deren Produktionsstart durch eine Karte ausgelöst wird. Die Anzahl der Karten legt den konstanten Bestand im System fest. Somit wird sowohl der Gesamtbestand des Teilbereiches, als auch der Bestand eines einzelnen Prozessschritts geregelt. Auf diese Weise wird versucht, die Vorteile der zentralen ConWiP-Steuerung mit denen der dezentralen Kanban-Steuerung zu kombinieren. Eine genaue Verfahrensbeschreibung und detaillierte Regeln für die kombinierte Kanban ConWiP-Steuerung gibt LÖDDING in *Verfahren der Fertigungssteuerung* [LÖDDING 2008, S.233 ff.]. Weitere Verfahren, wie die *Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BoA)*, das *Fortschrittszahlenkonzept* und andere Fertigungssteuerungsverfahren werden an dieser Stelle nicht vorgestellt, da sie die Fertigung steuern, aber keine Losgrößenoptimierung vornehmen.

3.5 Auswertung und Zusammenfassung

Ergänzend zu den vorgestellten organisatorischen Auswirkungen verändern die prozessorientierte Unternehmensführung und das Lean Management auch die technischen Gegebenheiten und nehmen damit Einfluss auf Losgrößenentscheidungen. Dabei ist nicht nur die Eliminierung von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten, sondern vor allem das *Single-Minute Exchange of Die (SMED)* zu nennen. Das SMED „is a theory and set of techniques that make it possible to perform equipment setup and changeover operations in under ten minutes [PRODUCTIVITY 1996, S.14]. Um das zu erreichen, werden Umrüßtätigkeiten so organisiert, dass so viele Aktivitäten wie

Fazit

Singuläre Berechnungen der Losgröße widersprechen einer prozessorientierten Unternehmensorganisation. Das Lean Management liefert bereits einige praxisorientierte Anhaltspunkte zur Losgrößenermittlung. Diese Verfahren werden aus Produktionssicht angestoßen und fokussieren Losgrößenoptimierungen für Produktionsprozesse. Neben einer umfassenden Betrachtungsweise fehlt ihnen eine integrierte Kostenbetrachtung.

4 Losgrößenermittlung auf Prozessebene

Die Kapitel zwei und drei geben einen Überblick über derzeit verwendete Verfahren zur Losgrößenermittlung sowie aktuelle Managementstrategien in Bezug auf Losgrößenoptimierungen. Darauf aufbauend werden nachfolgend die drei Säulen zur Losgrößenoptimierung erarbeitet: *Modellierung*, *Flexibilität* und *Kostenoptimierung*.

4.1 Prozessorientierte Modellierungsverfahren als Basis für die Losgrößenoptimierung

In Kapitel zwei dieser Arbeit wird gezeigt, dass Losgrößenoptimierungen in der Regel lokal durchgeführt werden und häufig der Blick auf ein Gesamtoptimum fehlt. Das ist auf die Betrachtungsweise der vorgestellten Verfahren und deren Vorgehensweise zur Optimierung der Losgröße zurückzuführen. In dieser Arbeit wird im Gegensatz zu den beschriebenen Vorgehensweisen ein Ansatz verfolgt, der eine umfassende Modellierung einbezieht. Deshalb erscheint es sinnvoll den Modellbegriff an dieser Stelle noch einmal aufzugreifen und die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit relevanten Modellierungsarten darzulegen.

Generell wird unter einem Modell „ein bewusst konstruiertes Abbild der Wirklichkeit“ verstanden, welches genutzt wird „um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist“ [KLAUS & BUHR 1975, S.805].

In der Literatur werden Modelle bezogen auf ihren Verwendungszweck in Beschreibungs- Erklärungs- und Entscheidungsmodelle gegliedert [SCHNEIDER 2004, S.9; FASTABEND 1997, S.21; GROSSKLAUS 1996 S.54]. Entscheidungsmodelle integrieren die Funktionen der Beschreibungs- und der Erklärungsmodelle, weil sie nicht nur beschreiben und auf die Ursache-Wirkungsbeziehungen der Elemente eingehen, sondern darüber hinaus auch Handlungsalternativen zur Lösung der modellierten Fragestellung und zur Leistung des Modells enthalten [MÜLLER 2005, S.82; KÜHLING 2000, S.12]. Darüber hinaus unterscheidet KRCMAR aus Sicht der Wirtschaftsinformatik objektorientierte, funktionsorientierte und prozessorientierte Modelle [KRCMAR 2011, S.10 ff.]. Unter objektorientierten Modellen werden solche verstanden, die sich an den wesentlichen Elementen ausrichten und diesen Eigenschaften und Methoden zuordnen. Sie haben ihren Ursprung in der Software-Entwicklung und orientieren sie sich stark an der funktionalen Organisation. Prozessorientierte Modelle hingegen geben die Realität durch Abläufe und ablauflogische Verknüpfungen wieder [KRCMAR 2011, S.10 f.]. Dies ist für eine Losgrößenbetrachtung zweckmäßig, weil die Modellierung dabei hilft, den Betrachtungsbereich festzulegen und die Prozesse im Betrachtungsbereich auf eine

Analyse vorzubereiten. So kann der Horizont von Losgrößenbetrachtungen erweitert und ein Gesamtoptimum angestrebt werden.

Die Verfahren *Wertstrommethode* und *Dortmunder Prozessketteninstrumentarium* sind beide prozessorientierte Verfahren zur Darstellung und Modellierung von Material- und Informationsflüssen. Sie haben sich durch vielfältige Anwendungen bewährt und liefern wichtige Anhaltspunkte für eine Losgrößenoptimierung auf Prozessebene. Aus diesen Gründen werden diese beiden Verfahren im Folgenden näher betrachtet und miteinander verglichen.

4.1.1 Wertstrommethode

Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.3 erörterten Verfahren fand die Wertstrommethode im Toyota Production System zunächst als Nebenerscheinung nur untergeordnete Bedeutung [ROTHER & SHOOK 2006, S.1]. Sie dient ebenfalls dem Zweck der Verschwendungsvermeidung, genauer gesagt dazu, Unternehmen auf die Wertschöpfung auszurichten und die in Kapitel 3 beschriebenen Prinzipien des Lean Managements umzusetzen. Dadurch hat die Wertstrommethode in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Wertstromdesign dient der Darstellung von Ist-Zuständen in Unternehmen und der Entwicklung von Soll-Zuständen, die schlanken und verschwendungsarmen Prinzipien folgen. Dabei liegt der Fokus auf den drei Ebenen Materialfluss, Informationsfluss und Personen-, bzw. Prozessfluss. Um diesen Ebenen gerecht zu werden und Optimierungen weg von einzelnen Verbesserungen hin zu einem übergreifenden Prozessoptimum zu lenken, bedient sich die Wertstrommethode vorgegebenen Darstellungs- und Abstraktionsmethoden.

Im ersten Schritt wird eine Produktfamilie identifiziert, bei der die Wertstrommethode angewendet werden soll. Danach wird aus der Kundenperspektive heraus – also retrospektiv – auf die wertschöpfenden Aktivitäten geschaut. Aus dieser Sicht des externen Kunden werden Material- und Informationsflüsse dargestellt und bezüglich ihres Kundennutzens analysiert. Ein Prozess ist hierbei durch einen „zusammenhängenden Materialflussbereich“ determiniert [ROTHER & SHOOK 2006, S.16]. Abgrenzungen der Prozesse erfolgen an den Stellen, wo der Material- oder der Informationsfluss zum Stehen kommen. Auf diese Weise limitiert der Wertstrom den Betrachtungsbereich der Prozessaufnahme faktisch auf die Fabrikebene. ROTHER und SHOOK verstehen die Prozessebene, sowie das Produktionsnetzwerk als weitere mögliche Anwendungsbereiche für das Wertstromdesign, obwohl das Flussprinzip dort nur schwer konstant aufrecht zu erhalten ist [ROTHER & SHOOK 2006, S.3].

Die zentralen Bausteine zur Aufnahme des Ist-Zustands mit der Wertstrommethode sind: Kunden, Lieferanten, Fertigungsprozesse, Bestände, Material- und Informationsflüsse. Abbildung 4-1 zeigt ihre Darstellung im Wertstromdesign:



Abbildung 4-1: Bausteine zur Ermittlung des Ist-Zustands im Wertstromdesign [ROTHER & SHOOK 2003, S.14 ff.]

Durch die Symbole des Wertstroms wird eine einheitliche Abstraktion der Realität begünstigt und seine einfache Lesbarkeit gewährleistet. Die folgende Darstellung zeigt beispielhaft, wie ein mit der Wertstrommethode aufgenommener Ist-Zustand aussieht.

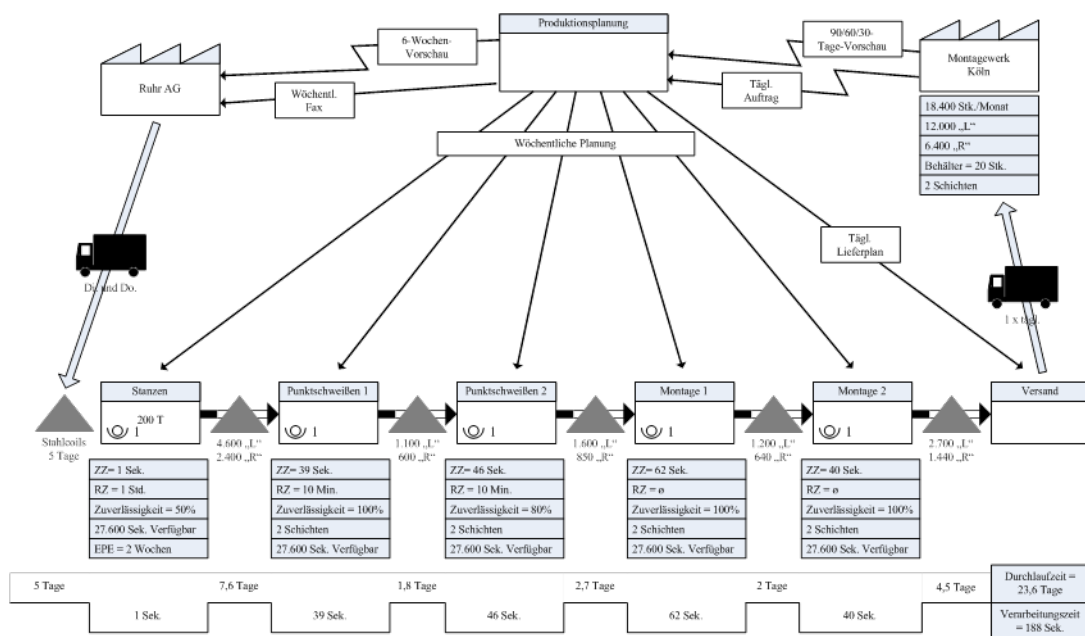


Abbildung 4-2: Exemplarischer Ist-Zustand beim Wertstromdesign [ROTHER & SHOOK 2006, S.26 f.]

Die Wertstromdarstellung wird, wie oben beschrieben ausgehend vom Kunden aufgebaut. Das bedeutet, dass sich der Wertstrom von rechts nach links entwickelt.

Der im Wertstrom dargestellte Kunde (hier ein Montagewerk in Köln) wird durch den zugehörigen Datenkasten mit wichtigen Kennzahlen charakterisiert. Durch die gezackten Pfeile der Informationsübermittlung zeigt sich, dass der Kunde durch EDV-Systeme Forecasts und einen täglichen Produktionsplan an das Beispielunternehmen übermittelt. Dieses kommuniziert über einen täglichen Lieferplan mit dem Versand und steuert die anderen Prozesse durch eine wöchentliche Planung. Dem Lieferanten (hier die Ruhr AG) wird ebenfalls ein Forecast, sowie ein Fax übermittelt. Die Prozesse sind durch das in Abbildung 4-1 vorgestellte Prozesssymbol veranschaulicht. Darin wurde

für den exemplarischen Ist-Zustand (Abbildung 4-2) zusätzlich die erforderliche Mitarbeiterzahl eingetragen. Bestände sind durch das Dreieckssymbol schnell sichtbar und die Fertigungsprozesse durch Datenkästen parametrisiert. Dort werden die wesentlichen prozessrelevanten Parameter, wie Zykluszeit, Rüstzeit, Schichtsystem, EPEI, etc. übersichtlich dargestellt. Unter den Prozessen und den zugehörigen Datenkästen ist die sogenannte Zeitlinie abgebildet. Sie zeigt die Prozessdurchlaufzeit oben und Wertschöpfungszeit unten. Außerdem sind die Durchlauf-, und die Verarbeitungszeit in der Darstellung ganz rechts ausgewiesen.

Für die Ermittlung des Soll-Zustands geben ROTHER und SHOOK acht Schlüsselfragen an, die nicht nur bei der Ermittlung des Soll-Konzepts helfen, sondern auch grundlegende Einblicke in die Vorgehensweise der Wertstrommethode erlauben [ROTH & SHOOK 2006, S.52]. Diese Fragen werden im Folgenden herangezogen, um die Modellentwicklung und Verwendung des Wertstromdesigns als Instrument zur Losgrößeroptimierung auf Prozessebene zu überprüfen.

- *Welche Taktzeit hat der Schrittmacherprozess?*
Der Prozess, vor dem keine Fließfertigung möglich ist. Hier wird die Produktion nivelliert. Losgrößen werden für diesen Prozess mit Hilfe des EPEI geplant und somit die Flexibilität der Prozesskette determiniert.
- *Erfolgt die Produktion für den direkten Versand, oder gibt es einen Puffer in Form eines Fertigteile-Supermarkts?*
Nachfrageschwankungen können bei der Direktbelieferung nicht aufgefangen werden. Losgrößen müssen der exakten Kundennachfrage entsprechen. Kosten- und Flexibilitätsoptimierungen werden erst durch einen Fertigteile-Supermarkt ermöglicht. Dieser ermöglicht eine schnellere Belieferung der Kunden, weil alle Varianten vorrätig sind. Dem gegenüber stehen jedoch die Kapitalbindungskosten.
- *An welchen Stellen kann eine kontinuierliche Flussfertigung implementiert werden?*
Flussfertigung wird bei der Wertstrommethode als Ziel formuliert und nach Möglichkeit überall implementiert. Innerhalb einer Fabrik erscheint das bereits schwer zu realisieren. Sind größere räumliche Distanzen zu überbrücken, so erscheint eine Kombination aus kontinuierlichem Fluss und losweiser Weitergabe der Produkte kostengünstiger zu sein.
- *Wie wird der Produktmix im Schrittmacherprozess gewährleistet und ausgeglichen?*
Flexibilität ist, wie bereits in Kapitel 3 gezeigt, unumgänglich um Überproduktion zu vermeiden. Losgrößen sind ein geeignetes Hilfsmittel, um Flexibilität zu gewährleisten aber auch die Produktion zu glätten.

- *In welchen gleichmäßigen Zeitintervallen werden Fertigerzeugnisse entnommen und eine Nachproduktion ausgelöst?*
Eine zuverlässige Prognose oder die gute Kommunikation mit den internen und externen Kunden erlaubt bessere Losgrößenoptimierungen und hilft Kosten zu sparen.
- *Welche Prozessverbesserungen sind erforderlich, um das entwickelte Soll-Konzept zu implementieren?*
Prozessverbesserungen in Bezug auf Ausrüstung und Organisation sind insbesondere bei der Verringerung von Losgrößen erforderlich.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die oben angeführte Symbolik der Wertstrommethode für die Entwicklung des Sollzustandes noch um weitere Symbole, wie beispielsweise Kaizen-Blitze, Supermärkte, unterschiedliche Kanban-Symbole, ziehende Materialflüsse und FIFO Strecken ergänzt werden muss. Für eine detaillierte Anleitung zum Wertstromdesign sei an dieser Stelle auf die Literatur von ERLACH, KLEVERS und ROTHER und SHOOK verwiesen. [ERLACH 2010, S.117 ff.; KLEVERS 2007, S.27 ff.; ROTHER & SHOOK 2006, S.6 ff.]

Die Wertstrommethode liefert viele Ansatzpunkte, um Losgrößenoptimierungen für eine Produktgruppe in einer Fabrik durchzuführen. In Bezug auf die Verwendung der Wertstrommethode bei der Ermittlung von Losgrößen auf Prozessebene lässt sich besonders der Fokus auf die Wertschöpfung und die Einführung fließender Produktionsströme, unter Eliminierung von Verschwendung hervorheben.

4.1.2 Dortmunder Prozessketteninstrumentarium

Der Paradigmenwechsel von der Funktions- zur Prozessorientierung²² in Produktion und Logistik wurde durch das *Dortmunder Prozesskettenparadigma* geprägt. Grund hierfür ist, dass es „den radikalen induktiven Ansatz des *Business Reengineering* mit der deduktiven schrittweisen Verbesserung des *Kaizen*“ verknüpft [KUHN 2008, S.215]. Im Prozesskettenmodell wird „die Prozessstruktur erfasst, welche die zeitlich logische Abfolge“ von Aktivitäten zur Erbringung einer Leistung für den Kunden repräsentiert [BECKMANN 2012, S.206]. Auf diese Weise wird eine vielfältige und umfassende Modellierung erreicht und der erforderliche Leitfaden erstellt, um „Aktivitäten und Ressourcen auf die kundennutzenorientierte Optimierung von Wertschöpfungsketten zu konzentrieren“ [KUHN 2008, S.216].

Inspiziert durch das Wertkettenmodell von PORTER [PORTER 1985, S.4 ff.] und die logistische Wertkette nach KLÖPPER [KLÖPPER 1991, S.133 ff.] wurde das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium in den 1990er Jahren am Fraunhofer Institut für

²² Der Strategiewechsel von der Funktions- zur Prozessorientierung ist bis heute noch nicht vollständig abgeschlossen, sondern findet weiterhin statt [TEN HOMPEL 2010, S.11].

Materialfluss und Logistik entwickelt. Seit dieser Zeit wurde es vielfältig zur Analyse, Darstellung und Prozessverbesserung von Geschäftsprozessen eingesetzt und stetig um zusätzliche Werkzeuge ergänzt. So entstand das Dortmunder Prozesskettenparadigma, welches sich zweier Grundbestandteile, dem *Prozessketteninstrumentarium* und dem *Prozesskettenmanagement* bedient, um Wertschöpfungsketten und die dazu erforderlichen Material- und Informationsflüsse zu veranschaulichen, analysieren und verbessern [JUNGMANN & UYGUN 2010, S.361]. Da die Modellierung in diesem Kapitel im Vordergrund steht, wird im Folgenden nur auf das Prozessketteninstrumentarium eingegangen und erst später wieder auf das Prozesskettenmanagement zurückgegriffen.²³

Basis des Prozessketteninstrumentariums ist die Darstellung von Material- und Informationsflüssen in Form von Prozesskettenplänen. Sie veranschaulichen alle Tätigkeiten, im Betrachtungs-, bzw. Analysehorizont. Hat ein Material- oder Informationsfluss mehrere unterschiedliche Lieferanten oder Kunden, so verzweigt sich eine Prozesskette. Auf diese Weise können Teilprozesse entstehen, die für sich betrachtet ebenfalls eigenständige Prozessketten sind. PIELOK unterscheidet folgende Teilprozessketten [PIELOK 1995, S.56]:

- des Materialflusses (beispielsweise alle Bearbeitungsschritte zur Herstellung einer Baugruppe oder die Tätigkeiten bei der Anlieferung eines Bauteils),
- des planenden, oder vorauseilenden Informationsflusses (beispielsweise die Avisierung einer Anlieferung) und
- des koordinierenden bzw. materialbegleitenden Informationsflusses (beispielsweise die Mengen- oder Gewichtskontrolle).

²³Einen detaillierten Überblick über Prozessverbesserungen und Logistikplanungen mit dem Dortmunder Prozesskettenparadigma geben beispielsweise [KUHN 1992 und 2007] sowie [KUHN & HELLINGRATH 2002].

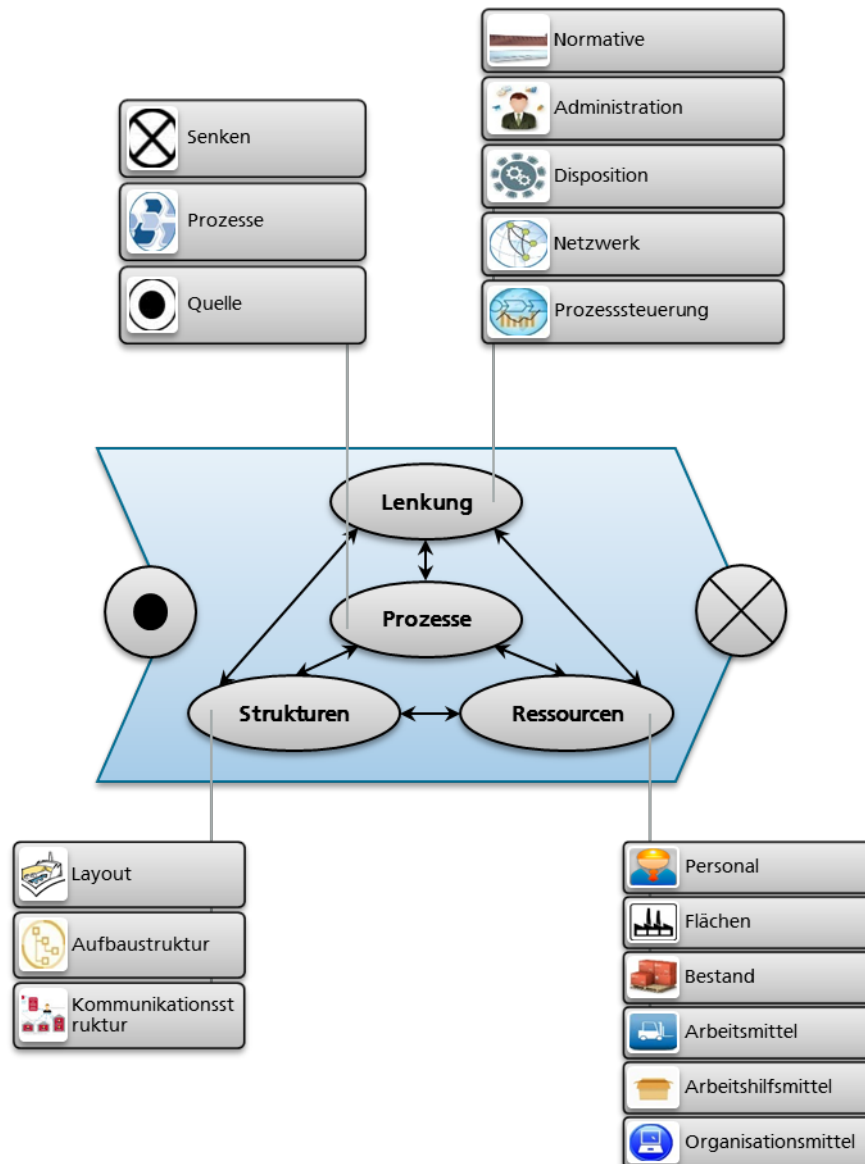


Abbildung 4-5: Potenzialklassen des Prozesskettenelements [KUHN 2008, S.223]

Abbildung 4-5 zeigt die 17 Potenzialklassen eines Prozesskettenelements, die aus den Modellierungsebenen des Prozesskettenelements abgeleitet werden [KUHN 1995, S.47]. Diese sind Quellen und Senken, Prozesse, Lenkung, Ressourcen und Strukturen. Durch sie wird die einheitliche Modellierung ermöglicht. Die Bedeutung der Potenzialklassen für die Modellierung im Prozessketteninstrumentarium wird im Folgenden benutzt um seinen Einsatz bei der Ermittlung der Losgröße auf Prozessebene zu überprüfen. Dazu wird die Funktion der Parameter nach KUHN [KUHN 1995, S.47] wiedergegeben und deren Auswirkungen auf eine Losgrößenermittlung auf Prozessebene erarbeitet:

- *Quellen und Senken legen die Schnittstellen des Prozesskettenelements zur Umwelt fest.*

An den Schnittstellen entscheidet sich, wie gut eine Losgröße auf das

Gesamtsystem abgestimmt ist. Oftmals kommt es aufgrund ungünstig gewählter Losgrößen zu Wartezeiten oder Beständen (sogenannten Reibungsverlusten).

- *Prozesse bilden bei detaillierterer Betrachtung eine weitere Prozesskette und werden durch die in Abbildung 4-5 gezeigte Struktur beschrieben.*

Bei einer übergreifenden Betrachtung ist es wichtig sämtliche, unterschiedliche Prozessarten einzubeziehen. Prüf-, Transport- und Bearbeitungsprozesse müssen in Losgrößenplanungen integriert werden, damit *Reibungsverluste* (s.o.) vermieden werden.

- *Lenkung beschreibt die Regeln und Steuerungsvorschriften, denen ein Prozess in der Prozesskette obliegt.*

An dieser Stelle wird ein kontinuierlicher Fluss oder eine abgestimmte losweise Übergabe festgelegt. Lenkung erfolgt (wie in Abbildung 4-5 gezeigt) auf unterschiedlichen Ebenen, so dass ein Prozess- und Gesamtoptimum angestrebt wird.

- *Ressourcen stellen einen Prozess mit den Fähigkeiten aus eine Transformationsleistung zu erbringen.*

Ressourcen kommt damit eine wesentliche Rolle für die Losgrößenoptimierung zu. Sie sind kritisch in Bezug auf Verfügbarkeit, Flexibilität und Kosten.

- *Strukturen bilden den Bezugsrahmen für die kundenorientierte Transformationsleistung eines Prozesses.*

Strukturen sind für Losgrößenentscheidungen nicht direkt entscheidend, da Losgrößenoptimierung vielmehr den Ablauf und die Prozesse selbst betreffen. Dennoch begünstigen oder erschweren Strukturen die Losgrößenoptimierung, abhängig von Layout, Aufbau- und Kommunikationsstruktur.

Prozesse repräsentieren und beschreiben die tatsächliche Leistungstransformation im Prozessketteninstrumentarium, wie sie in der Realität erfolgt. Ein *Prozesskettenelement* stellt den Prozess im Sinne der Prozessdefinition aus Kapitel 3 dar. Dazu muss es die charakteristischen Prozessfunktionen der

- Input-Output Beziehung
- Kunden-Lieferantenbeziehung und
- der transformatorischen Beziehung

symbolisieren [BINNER 2005, S.320 f.]. Einen Wertzuwachs erfährt ein Basisobjekt, von einigen Ausnahmen abgesehen,²⁴ nur durch Bearbeitungsprozesse. Die übrigen Prozesstypen verursachen lediglich einen Ressourcenverbrauch [KUHNS 1995, S.43 f.]. Die Input-Output bezogene Sichtweise auf Prozesse wird mit Hilfe so genannter *Leistungsobjekte* erreicht. Sie durchlaufen die einzelnen Prozessschritte und wandeln

²⁴Beispiele für eine Wertsteigerung ohne einen Bearbeitungsprozess sind: Das Reifen von Käse, Wein und Whiskey.

Eingangsgüter und -erzeugnisse in definierte Outputs, bzw. Erzeugnisse um. Vorgelagerte Prozesskettenelemente beziehen Leistungsobjekte und stellen sie nachgelagerten Elementen zur Verfügung [KLÖPPER 1991, S.142 f.]. Diese Funktion sowie die chronologische (ablauflogische) Verkettung der Komponenten untereinander führen zu der aus Prozesssicht erforderlichen *Kunden-Lieferanten-Beziehung*. Kundenprozesse rufen die definierten Outputs der Lieferprozesse bedarfsgerecht ab. Die transformatorische Sichtweise auf die Prozesse spielt im Dortmunder Prozesskettenparadigma eine besondere Rolle, da eine direkte Verknüpfung zwischen den Prozessen und den von ihnen in Anspruch genommenen Ressourcen möglich ist. Diese Beziehung wird in Kapitel 4.3 vertieft, weil sie eine wesentliche Grundlage der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung bildet.

Die Bewertung von Prozessketten und deren Prozessen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine Klassifizierung anhand des Kundennutzens ist genauso möglich, wie die Bewertung der Prozesse auf Basis von Betriebskennlinien. EGLI [EGLI 2001, S.51 ff.] führt die Transportkennlinien als Ansatz zur Analyse von Materialflusssystemen ein und WIENDAHL erarbeitet die Kennlinienzusammenhänge von Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue [WIENDAHL 2008, S.237 ff.]. BECKMANN ET AL. stellen darauf aufbauend einen Ansatz zur Zusammenführung des Prozessketteninstrumentariums mit der Bewertungssystematik der Kennlinien vor [BECKMANN ET AL. 2014, S.26]. Außerdem beinhaltet das Dortmunder Prozesskettenparadigma ein Verfahren zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung, welches in Kapitel 4.3. verwendet wird, um Erkenntnisse für die Losgrößeroptimierung abzuleiten.

4.1.3 Verfahrensvergleich und Auswahl

Wie gezeigt werden konnte, handelt es sich bei der Wertstrommethode und beim Dortmunder Prozessketteninstrumentarium um grundsätzlich verschiedene Ansätze zur prozessorientierten Modellierung. Beide Verfahren sind in der Lage, Prozesse in unterschiedlichem Detaillierungsgrad abzubilden und grundsätzlich für eine Analyse der Losgrößeroptimierung auf Prozessebene geeignet.

FUNK erarbeitet einen Vergleich der beiden Verfahren vor dem Hintergrund der Fabrikstrukturanalyse und -modellierung. [FUNK 2014, S.39] Dazu verwendet er die Kriterien Gegenstand (der Analyse), Zielsetzung, Methode, Modellierung, Ebene, Zeit und Bewertung. Aufbauend auf dieser Vergleichssystematik wird die Bewertung für diese Arbeit vor den Hintergrund der Losgrößeroptimierung gestellt und diesbezüglich adaptiert:

Kriterium	Wertstrommethode	Prozessketteninstrumentarium
Modellierungsgrundlage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine Produktfamilie ▪ Integrierte Darstellung von Produktionsprozessen, Material- und Informationsflüssen eines Unternehmens 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leistungsobjekte (Aufträge, Produkte, etc.) ▪ Ganzheitliche, unternehmensübergreifende Darstellung der Auftragsbearbeitungs-, Lenkungs-, Informations- und Materialflussprozesse
Zielsetzung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implementierung des Lean Managements und dessen Prinzipien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung der Ablaufstrukturen durch induktive und deduktive Vorgehensweise
Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modellentwicklung anhand vorgegebener Richtlinien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bildet einen Bezugsrahmen mit Potenzialklassen ▪ Keine weiteren Vorgaben
Detaillierungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Skalierbar ▪ Prozesse werden anhand des Materialflusses abgegrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Skalierbar durch Selbstähnlichkeit der Prozesselemente ▪ Keine Vorgaben zur Abgrenzung der Prozesse
Zeitliche Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitliche Entkopplung von Material- und Informationsfluss 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Streng chronologisch
Bewertungskriterien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beitrag zur Wertschöpfung ▪ Durchlaufzeiten und Taktabstimmung ▪ Fokus: Gesamter Wertstrom 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beitrag zur Wertschöpfung ▪ Betriebskennlinien ▪ Prozesskosten ▪ Fokus: Einzelne Prozesse

Abbildung 4-6: Vergleich der Wertstrommethode mit dem Prozesskettenparadigma [FUNK 2014, S.39]

Abbildung 4-6 stellt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Verfahren gegenüber. Die Wertstrommethode liefert einen genauen Leitfaden zur Modellierung mit vorgegebenen Richtlinien. So wird der klare Fokus auf eine Produktfamilie und die umfassende Betrachtung eines Wertstroms ermöglicht. Dies beinhaltet auch bereits Vorschläge und Möglichkeiten zur Losgrößenermittlung, sowie Prozessoptimierungen und steuerungstechnische Aspekte des Materialflusses, wie beispielsweise Taktabstimmungen der Prozesse, Pull-Steuerungen, etc.

ROTHER und SHOOK schlagen bei komplexeren Abläufen vor, „lediglich den Fluss für die wichtigsten Rohmaterialien nach [zu zeichnen]. Die Darstellung *aller* zugekauften Teile eignet sich eher für ein Layout-Diagramm von einem Prozess.“ [ROTHER & SHOOK 2003, S.22].

Das Prozesskettenparadigma liefert durch den beliebig skalierbaren Detaillierungsgrad, welcher durch Selbstähnlichkeit der Elemente erreicht wird, eine sehr flexible Grundlage, um eine umfassende und allgemeine Betrachtung der Losgrößeroptimierung durchzuführen.

Außerdem hilft die integrierte Kostenbetrachtung dabei, wichtige Hinweise für eine Losgrößenermittlung zu gewinnen und liefert den Bezugsrahmen sowie das Handwerkszeug zur prozessübergreifenden Optimierung von Losgrößen. Darüber hinaus ermöglicht es, unterschiedlichste Aktivitäten detailliert zu betrachten, ohne den Einfluss auf die gesamte Prozesskette aus den Augen zu verlieren. Für die Entwicklung einer Losgröße auf Prozessebene, die nicht ausschließlich auf eine Produktfamilie oder einen Wertstrom fokussiert, sondern den Betrachtungsrahmen weiter fassen soll, wird in dieser Arbeit das Dortmunder Prozesskettenparadigma verwendet. Losgrößeroptimierungs- und Berechnungsverfahren, die im Zuge (bzw. auf Basis) der Wertstrommethode entwickelt wurden, dennoch berücksichtigt. Diese spielen im Folgenden eine wichtige Rolle. Insbesondere dem EPEI Verfahren wurde in Kapitel 3.4.3 bereits besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Fazit

Das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium ist aufgrund seiner beliebigen Skalierbarkeit und des klaren Fokus auf die Prozesse sowohl für die Entwicklung einer Losgröße auf Prozessebene, als auch für die dezentralen, autonomen Strukturen, die durch Industrie 4.0 gefordert werden, bestens geeignet. Die Sichtweise auf einzelne Prozesse einerseits, aber der Fokus auf die gesamte Prozesskette andererseits qualifizieren es für die Modellierung der Losgrößeroptimierung dieser Arbeit in besonderer Weise.

4.2 Flexibilität als Kriterium zur Losgrößeroptimierung

Da stochastische Losgrößenmodelle in dieser Arbeit bewusst ausgeklammert wurden, stellt sich ganz besonders die Frage, wie im Betrachtungsbereich auf schwankende äußere Einflüsse eingegangen werden soll. BAUERNHASL, sieht die Produktion „an der Schwelle von der Kompliziertheit zur Komplexität“ angekommen und leitet daraus ab, dass es nicht mehr möglich sein wird, alle Prozesse zu beschreiben und zu prognostizieren. Deshalb schlussfolgert er, dass “Unternehmen [...] deshalb an ihrer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit arbeiten [müssen] um sich schnell und wirtschaftlich an Veränderungen anpassen zu können. [BAUERNHANS� ET AL. 2014, S.13] Im Rahmen der Ausführungen zur Prozessorientierung, insbesondere in den

Kapiteln 3.2. und 3.4 wird darüber hinaus deutlich, dass die Flexibilität eine wichtige Zielgröße in verschwendungsarmen und prozessorientierten Strukturen darstellt.

Allgemein betrachtet, bezeichnet Flexibilität „die Fähigkeit eines Systems auf Veränderungen zielgerichtet reagieren zu können“²⁵ [PIBERNIK 2001, S.41]. Bezogen auf das unternehmerische Umfeld sind solche zielgerichteten Handlungen Teil der Unternehmensstrategie. Ist diese flexibel, so beinhaltet sie Handlungsalternativen zur Zielerreichung. Auf diese Weise reduziert sich das Risiko für ein Unternehmen, durch schwankende äußere Umstände benachteiligt zu werden. Ferner bietet eine flexible Unternehmensausrichtung die Chance, von sich ändernden Umständen zu profitieren. [ADAM ET AL. 1990, S.44 f.]

Insbesondere in aktuellen Publikationen fällt im Zusammenhang mit Flexibilität häufig der Begriff der Wandlungsfähigkeit [SPATH 2008, S.11 ff.; WIENDAHL 2002, S.5 ff.]. Dieser zielt auf strukturelle Veränderungen der Wertschöpfungskette ab. Sie sind langfristiger Natur und daher nicht mehr Indikatoren der Flexibilität im engeren Sinne. GRUNDIG definiert Flexibilität aus Prozesssicht als „eine vordefinierte, installierte (aktivierbare) taktische Fähigkeit von Produktions- und Logistikprozessen [...] die eine elastische, reaktive Anpassung an veränderte Produktionsbedingungen in der Arbeitsplatz- und Bereichsebene ermöglicht, ohne dass substanzielle Veränderungen erforderlich sind“ [GRUNDIG 2009, S.33]. Flexibilität umfasst somit qualitative und quantitative Attribute von Personal und Arbeitsmitteln, die es Unternehmen ermöglichen auf Schwankungen zu reagieren, ohne dabei bestehende Strukturen zu verändern. Vielmehr beinhalten diese Attribute bereits Reaktionsmöglichkeiten. Für die Losgrößeroptimierung an sich sind vor allem quantitative und zeitliche Schwankungen im Betrachtungsumfeld relevant, insbesondere in Bezug auf die Nachfrage und Rohstoffe. Nicht zuletzt führt auch die „Ausweitung der Produktionsprogramme als Ausdruck einer stärkeren Kundenorientierung, zum Beispiel durch Erhöhung der Variantenzahlen, [...] zu einer Zunahme der Heterogenität der Aufträge und damit auch zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Flexibilitätsbedarf“ [BEHRBOHM 1985, S.26].

Je flexibler ein Prozess ist, desto schneller kann er auf zeitlich und mengenmäßig veränderte Nachfragen reagieren. Sind mehrere Prozesse einer Prozesskette flexibel konzipiert, so trägt dies maßgeblich dazu bei, die Abläufe zu harmonisieren und somit Kundenwünsche zu erfüllen. Diese Art der Betrachtung wirft die Frage auf, wann ein Prozess als flexibel bezeichnet werden kann und wie Flexibilität als Zielgröße definiert werden sollte. Dieses wird daher im folgenden Abschnitt erörtert.

²⁵PIBERNIK gelangt zu dieser Definition nach einer umfassenden Begriffsbestimmung der Flexibilität im unternehmerischen Umfeld, wie unter Anderem HANSSMANN, MÖSSNER und ALTROGGE. [HANSSMANN 1993, S.227, MÖSSNER 1982, S.54-55, ALTROGGE 1979, S.605].

4.2.1 Flexibilität – Mittel zum Zweck oder eigenständige Zielgröße?

Je nach Blickwinkel, aus dem die Flexibilität betrachtet wird, kann ihr Charakter unterschiedlich aufgefasst werden. Für die Losgrößenbetrachtung bietet es sich an, Flexibilität aus einer taktischen und operativen Sichtweise zu erörtern, da Losgrößenentscheidungen auf diesen Ebenen getroffen werden.

Die Theorie der Prozessorientierung geht davon aus, dass mit der Wahl einer verringerten Losgröße die Flexibilität steigt. Das Lean Management (Kapitel 3.3) geht dabei noch einen Schritt weiter und definiert jeglichen Bestand als Verschwendung. Es verlangt deshalb strenge Losgrößenminimierungen, bis hin zu Losgröße Eins (Kapitel 3.4.1). Damit stellen sich die Fragen, ob

1. Flexibilitätsüberlegungen ein Mittel zur Reduzierung des eingesetzten Kapitals sind und
2. für die Bestrebung mehr Flexibilität zu erreichen eigentlich Kostenüberlegungen treibend sind.

Folgt man diesen Prämissen, so erscheint es zweckmäßig, die Flexibilität mit Kosten zu bewerten und die Kapitalbindungskosten der klassischen Losgrößenermittlung durch Flexibilitätskosten zu ersetzen. Dies führt jedoch ähnlich wie in Kapitel 2.1 beschrieben zu einer primär statischen und kausal eingeschränkten Betrachtung der Realität. Denn Flexibilität und Bestand sind keineswegs sich ausschließende Gegensätze. Je kleiner die Losgröße (größer die Flexibilität), desto leichter kann ein Prozess auf mengenmäßige Veränderungen der Nachfrage reagieren. Andererseits versetzt ein vorgehaltener Bestand einen Prozess ebenfalls in die Lage, flexibel auf Veränderungen der Nachfrage zu reagieren. [WESTKÄMPER, ET AL. 2009, S.240 f.]

Wird von der grundsätzlichen Prämisse ausgegangen, dass plötzliche Schwankungen in der Nachfrage nie völlig ausgeschlossen werden können, also auch „durch Einbau von Flexibilität das Risiko nicht völlig ausgeschaltet werden kann, so besteht doch meist die Möglichkeit, es durch bewusste Wahl eines Bestandes mit höherer Flexibilität zu reduzieren“ [ADAM, ET AL. 1990, S.32]. Bestandsmengen kommt dabei eher die Aufgabe des Ausgleichs zeitlicher Schwankungen zu. In der Prozessorientierung (und im Lean Management) wird dieser Gedanke durch das Supermarktprinzip aufgegriffen (vgl. Kapitel 3.4.2). Bestand widerspricht also keineswegs dem Kriterium der Flexibilität, sondern er ist sogar erforderlich, um dieses zu erfüllen.

Allerdings verursacht Bestand zwingend – nicht zuletzt durch die Lagerung – Kosten. Folglich handelt es sich bei Flexibilität nicht um eine fixe Größe, die ausschließlich durch eine Kostenbetrachtung beschrieben werden kann. Vielmehr geht es darum, Prozesse und letztlich eine Prozesskette mit Möglichkeiten auszustatten, zielgerecht auf die dynamischen äußeren Umstände zu reagieren. Auch diese Betrachtung ist

unvollständig, denn Wettbewerbsvorteile entstehen letztlich nur, wenn die Flexibilitätpotenziale möglichst ohne Zeitverlust erschlossen werden. Diesbezüglich definiert NYHUIS Flexibilität als „die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen“ [NYHUIS ET AL. 2008, S.24]. Daher erscheint eine zeitliche Bewertung der Zielgröße Flexibilität notwendig.

NYHUIS bildet für die Bewertung von Flexibilität so genannte Flexibilitätskorridore. Diese umfassen die Möglichkeiten, die ein Prozess zur Reaktion auf veränderte Einflussfaktoren hat und „innerhalb dieser [...] beispielsweise Stückzahlveränderungen in einem vorab festgelegten Ausmaß aufgefangen werden“ können [NYHUIS 2010, S.9]. Jedoch scheint es in Bezug auf die Losgrößenermittlung viel greifbarer und einfacher, die Flexibilität eines Prozesses durch die Rüstzeit zu determinieren. Das liegt vor Allem daran, dass auf der taktischen und operativen Ebene (in der die Losgrößeroptimierung stattfindet) begrenzte Änderungsfaktoren vorherrschen und alle im Sinne der Betrachtung einen Produktwechsel zur Folge haben. Die Losgröße spielt folglich bei der Flexibilitätsbetrachtung eines Prozesses nicht die wesentliche Rolle, sondern vielmehr die Rüstzeit des Prozesses. Es lässt sich festhalten, dass die Flexibilität zunimmt, je kürzer die Rüstzeit eines Prozesses ist.

Diese wird in dieser Arbeit sowohl als Mittel zur Gesamtzielerreichung auf der normativen Ebene, als auch als eigenständige Zielgröße für operative Prozesse angesehen. Dabei kommt es insbesondere darauf an, wie sie mit den anderen „Zielen sowie den verfügbaren Mitteln abzustimmen und in ein Gesamtzielkonzept zu integrieren“ [THIELEN ET AL. 1993, S.90] ist. Auf diese Weise wird das Potenzial der Losgrößeroptimierung, produktionstechnische Abläufe in einem Unternehmen zu harmonisieren ausgenutzt. Zudem werden auch organisatorische Potenziale wie kurze Reaktionszeiten auf Kundenwünsche erschlossen. Mit diesem Anspruch wird eine Methode entwickelt, die Flexibilität als Säule der Losgrößenermittlung versteht und sie in das Gesamtzielsystem des Unternehmens einbindet. Deshalb wird die Flexibilität als Ziel der Losgrößeroptimierung verwendet. Denn sie ermöglicht es,

- Wettbewerbsvorteile zu nutzen, die sich spontan ergeben
- Bestände gezielter zu planen und
- das Warten zwischen Prozessen/ Prozessschritten zu verringern, um
- Durchlaufzeiten zu vermindern und
- schneller auf veränderte Nachfragen zu reagieren.

Daraus folgt, dass die Flexibilität eine entscheidende Zielgröße, nicht jedoch alleiniges Merkmal bei der Losgrößerberechnung ist.

4.2.2 EPEI zur Losgrößerberechnung

Als entscheidende Messgröße zur Erreichung von Flexibilität in der Losgrößenermittlung wird in der Literatur der *Every Part Every Interval*-Wert angegeben. Wie bereits in Kapitel 3.4.3 beschrieben, gibt der EPEI-Wert an, welchen Zeitraum ein Produktionsprozess benötigt, um von allen von ihm zu fertigenden Produktvarianten jeweils ein Los zu produzieren [ERLACH 2010, S.67]. ERLACH erarbeitet ein Verfahren, das er als „gut geeignet zur Losgrößenermittlung in Kanban-Systemen bei vorgegebenem Rüstzeitanteil“ [ERLACH 2010, S.183] einschätzt und das den Every Part Every Intervall-Wert (EPEI) zur Losgrößenermittlung verwendet. Dazu verwendet ERLACH, wie zuvor beschrieben, eine zeitliche Bewertung der Rüstvorgänge. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass ein Betriebsmittel während der gesamten täglichen Arbeitszeit entweder zum Produzieren oder zum Rüsten verwendet werden kann. Störungs- und Wartungszeiten werden hierbei vorher abgezogen, also die Verfügbarkeit des Betriebsmittels dementsprechend reduziert.

Zur Berechnung der Belegung einer Ressource geht er dann retrograd vor und reduziert die verbleibende Zeit ausgehend von einer Verfügbarkeit von 100 % um die täglich benötigte Bearbeitungszeit. Die verbleibende Zeit wird komplett zum Rüsten verwendet. Auf diese Weise wird versucht, das Portfolio eines Prozesses, das in bereits in Darstellung 3-2 als Produktionsrad, bestehend aus den Varianten 1, 2, ..., 8 dargestellt ist, so häufig wie möglich durch zu produzieren. Bildlich gesprochen, wird also versucht, das Produktionsrad so häufig wie möglich zu drehen. Der EPEI Wert errechnet sich folglich aus der Summe der Rüstzeiten, geteilt durch die täglich für das Rüsten zur Verfügung stehenden Zeit:

$$EPEI_{Min} = \frac{\sum Rüstzeiten}{tgl. Rüstzeit} = \frac{\#Var * RZ}{(AZ * \#Res) * V - MBZ}$$

Mit #Var	Anzahl der Varianten [Stk.]
RZ	Rüstzeit [ZE]
AZ	Arbeitszeit [ZE]
V	Verfügbarkeit [%]
MBZ	Maschinenbelegungszeit [ZE]

Auf diese Weise wird die im Produktionsprozess minimal zulässige Reichweite eines Loses ermittelt. Die Losgröße entspricht dem Bedarf in dem Zeitraum, in dem eine Produktvariante produziert wird. Folglich muss der so ermittelte $EPEI_{Min}$ mit dem durchschnittlichen Tagesbedarf multipliziert werden:

$$LG_i = EPEI_{Min} * Tagesbedarf_i$$

Zur Veranschaulichung dieser Vorgehensweise dient folgendes Beispiel:

Einem Prozess seien sechs Produktvarianten zugeordnet, die er produzieren soll. Die Umrüstzeit betrage unabhängig von der Umrüstreihenfolge zwei Stunden. Der durchschnittliche Tagesbedarf betrage in Summe 500 Fertigprodukte und die Bearbeitungszeit (ebenfalls unabhängig von der Produktionsvariante) 90 Sekunden. Das Kapazitätsangebot sei im Zweischichtbetrieb, abzüglich der Pausenzeiten 15 Stunden. Der Prozess verfüge außerdem über eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 95 %.

Die Rüstzeitensumme, um das gesamte Produktspektrum jeweils einmal einzurüsten beträgt folglich 12 Stunden und der tägliche Kapazitätsbedarf $500 \text{ Stk.} * 1,5 \text{ Min} = 750 \text{ Min} = 12,5 \text{ Stunden}$. Durch Einsetzen in die $EPEI_{\text{Min}}$ Formel ergibt sich:

$$EPEI_{\text{Min}} = \frac{6 * 2h}{\frac{15h}{d} * 95\% - \left(\frac{500}{d} * 90s\right)} = \frac{12h}{\frac{14,25h}{d} - \frac{12,5h}{d}} = 6,86d$$

Der Produktionsprozess ist in der Lage, das von ihm geforderte Produktionsprogramm in 6,86 Tagen abzudecken. Die Losgröße errechnet sich folglich produktweise aus dem durchschnittlichen Kundenbedarf in 6,86 Tagen.

Die Verwendung des EPEI-Wertes zur Losgrößenberechnung führt wie intendiert zu einer sehr hohen Flexibilität der Prozesse. Andere Optimierungskriterien werden dabei jedoch vernachlässigt. Dies gilt insbesondere für die Kostenoptimierung. Wird der EPEI-Wert zur Losgrößenoptimierung verwendet, sollte zumindest überprüft werden, ob bei einer Vergrößerung des Zeitraumes bzw. EPEI-Wertes, wie beispielsweise einer Verdopplung, trotzdem den Kundenbedarfen entsprochen werden kann. Dann nämlich ist auf diese Weise eine deutliche Optimierung der Umrüstvorgänge und somit der Kosten möglich.

Daraus folgt, dass, wenn eine Losgröße als optimal gilt, wenn die Kosten möglichst gering gehalten werden – wie in dieser Arbeit angenommen – Flexibilität nicht der ausschlaggebende Faktor bei der Losgrößenberechnung sein kann.

Fazit

Bezogen auf einen Prozess gilt: Je kürzer die Rüstzeit, desto größer die Flexibilität eines Prozesses.

Flexibilität ist nicht nur ein Mittel zur Kostenreduzierung, sondern statet Prozesse und Wertschöpfungsketten mit Potentialen aus, sich an sich verändernde Umstände anzupassen und so schnell und gewinnbringend zu reagieren. Dafür muss die Zielgröße Flexibilität in einem geeigneten Bezugsrahmen implementiert werden.

4.3 Kostenoptimierung als Kriterium zur Losgrößenermittlung

Nicht nur aus historischen Gründen, wie in Kapitel 2 beschrieben, sondern aus grundsätzlichen betriebswirtschaftlichen Erwägungen ist die Kostenreduzierung ein Hauptgrund und damit zwingendes Kriterium bei der Losgrößenoptimierung. In dieser Arbeit wurden bereits gängige Verfahren der Losgrößenoptimierung einander gegenübergestellt und gezeigt, dass die Auftragswechsel- und Lagerkosten in der Modellierung eine dominierende Rolle spielen. Wird der Anwendungs- und Gültigkeitsbereich von Losgrößen auf Prozesse und Prozessketten bezogen, so erfordert das, die Kostenbetrachtung ebenfalls im Gesamtzusammenhang zu betrachten.

Die betriebliche Kostenrechnung hat sich in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt. Aus den grundlegenden Problemen der klassischen Vollkostenrechnung resultiert, [ZIMMERMANN ET AL. 2003, S.234 f.]

- dass die Kosten nur zum Teil verursachungsgerecht aufgeschlüsselt werden können,
- die ermittelten Kostensätze als linear steigend angenommen werden und
- die Auslastung der einzelnen Ressourcen nicht berücksichtigt wird.

Je nach Ziel einer Betrachtung kann es hilfreich sein, unterschiedliche Kostenrechnungsverfahren zu verwenden. Diese Arbeit bedient sich der Prozesskostenrechnung, um anhand von Kosteneinflüssen Aussagen über produkt- und prozessspezifische, bzw. prozessübergreifende Losgrößen zu treffen. Dazu werden Kosten anhand von Prozessen aufgeschlüsselt. Es ist nicht das Ziel dieser Arbeit, Vor- und Nachteile der Prozesskostenrechnung im Vergleich zu anderen Kostenrechnungsverfahren, insbesondere der Grenzplankostenrechnung, zu erarbeiten oder gar ein Verfahren für die unternehmerische Praxis auszuwählen.²⁶ Vielmehr geht es um die Einbindung der Methodik in den Kausalzusammenhang, um neue Erkenntnisse für die Losgrößenermittlung zu gewinnen.

Die in Kapitel 1 beschriebene zunehmende Individualisierung der Märkte führt zu kundenindividuelleren Produkten und einer höheren Variantenvielfalt in der Produktpalette eines Unternehmens. Für die Losgrößenoptimierung bedeutet das, dass Mehraufwand in Bezug auf Planung, Steuerung und Koordination auftritt. Diese werden in der klassischen Kostenrechnung zu den Gemeinkosten gezählt und den Produkten prozentual zugerechnet. Aus dem Bestreben heraus, diese Schwachstellen zu

²⁶Zur Abgrenzung der Prozesskostenrechnung von anderen Verfahren siehe beispielsweise [RECKENFELDERBÄUMER 1998, S.125 ff.] Entwicklungsstand und Perspektiven der Prozesskostenrechnung.

überwinden entwickelte sich in den 1980er Jahren eine neue, am Prozess orientierte Kostenrechnung. COOPER und KAPLAN entwickelten in den USA ein Verfahren zum *Activity Based Costing* [COOPER & KAPLAN 1988, S.96ff.]. Es sieht Aktivitäten als Grund für die Entstehung von Aufwänden und rechnet diesen entsprechend Kosten zu. Im deutschsprachigen Raum prägten HORVÁTH und MAYER den Begriff der Prozesskostenrechnung [HORVÁTH & MAYER 1989, S.214 ff.]. Der Ansatz beider Modelle ist identisch, bezüglich der Zielsetzung, Methodik und in ihrem Anwendungsbereich weisen sie jedoch geringfügige Unterschiede auf [HORVATH ET AL. 1993, S.16 f.]. Die Prozesskostenrechnung unterscheidet darüber hinaus, variable (durch die Leistungsmenge induzierte) und fixe (leistungsmengenneutrale) Kosten [KRUMP 2002, S.31].

Durch ihre Sichtweise auf Prozesse, Aktivitäten und Abläufe fokussiert die Prozesskostenrechnung mehr als die funktionalen, kostenstellenorientierten Betrachtungen. Vielmehr wird transparent, wodurch Kosten entstehen, weil diese prozessabhängig zugerechnet werden können. Dadurch wird die Leistungserstellung an sich betrachtet und mit ihren Kosten belegt. Das Verursacherprinzip kann wesentlich besser eingehalten werden, als bei einer Verallgemeinerung über Kostenstellen [JUNG 2010, S.448]. Indirekte Bereiche, wie beispielsweise Beschaffung, Marketing, Vertrieb, etc. können aufgrund ihres Beitrags zur Leistungserstellung analysiert und ihre Kosten auf die Prozesse umgerechnet werden. Dies führt zu einer bereichs- und kostenstellenübergreifenden Betrachtungsweise. Ein Umweg über Deckungsbeiträge und Gemeinkosten entfällt.

Bei der Bewertung der Prozesskostenrechnung als Verfahren zur Gemeinkostenreduzierung und Prozessoptimierung werden in der Literatur drei Effekte hervorgehoben:²⁷

1. Der *Allokationseffekt* beschreibt die angesprochene Verzerrung der Gemeinkosten bei der Zurechnung auf den Kostenträger einer Zuschlagskalkulation. Die Ursache dafür liegt in darin, dass sich Gemeinkosten in der Regel nicht proportional zur Zuschlagsbasis verhalten. Das heißt, dass unabhängig von der Anzahl der zugrundeliegenden Prozesse, der gleiche Zuschlagssatz auf alle Produkte aufgeschlagen wird. Werden zwei Produkte verglichen, deren Rohstoffe unterschiedlich viele Beschaffungsstufen aufweisen, so wird das Produkt mit weniger Beschaffungsaufwand mit dem gleichen Zuschlagssatz belegt, wie das andere Produkt. Damit steht es in der Kostenbetrachtung schlechter dar. Bei einer prozessorientierten Kalkulation

²⁷COENENEGERG und FISCHER beispielsweise beschreiben diese Effekte der Prozesskostenrechnung in ihrem Werk, *Prozesskostenrechnung - Strategische Neuorientierung in der Kostenrechnung* [COENENEGERG & FISCHER 1991, S.28 ff.].

werden diese Kosten anhand der Prozesse verrechnet und den Produkten somit verursachungsgerecht zugeordnet.

2. Der *Komplexitätseffekt* beschreibt die Produktvielfalt in ihren Ausprägungsvarianten und der damit verbundenen Komplexität. Bei der Herstellung von komplexeren Produkten entsteht gegenüber Standardprodukten ein höherer Bedarf an gemeinkostenverursachenden Aktivitäten wie z.B. Materialdisposition, Produktionsvorbereitung oder Qualitätssicherung. Somit kann unterstellt werden, dass ein komplexeres Produkt eine höhere Prozessinanspruchnahme aufweist, beispielsweise in der Beschaffung der Rohstoffe. Die prozessorientierte Kalkulation trägt diesem Umstand Rechnung, wohingegen die Zuschlagskalkulation die höhere Inanspruchnahme von Prozessen nicht abbilden kann. Folglich rechnet sie komplexeren Produkten zu wenig Gemeinkosten anteilig zu niedrige und weniger komplexen Produkten zu hohe Gemeinkosten zu.
3. Der *Degressionseffekt* tritt bei Produkten, die in unterschiedlichen Mengen hergestellt und abgesetzt werden auf. Es wird unterstellt, dass größere Auftragsmengen bestimmte Prozesse unterproportional beanspruchen. Während bei der traditionellen Zuschlagskalkulation die Gemeinkosten prozentual pro Stück verrechnet werden, sind bei der Prozesskostenrechnung nur die individuell in Anspruch genommenen Prozesse relevant. Das bedeutet, dass bei der Zuschlagskalkulation nur die Selbstkosten pro Stück konstant sind. Kleinere Aufträge oder Losgrößen werden nicht ausreichend, größere Aufträge zu hoch mit Gemeinkosten belastet. Berücksichtigt werden muss, dass sich Prozesskosten pro Stück bei Abwicklungs-, Materialbeschaffungs-, oder Fertigungsprozessen bei größeren Produktionsmengen verringern. Der Aufwand für die Abwicklung eines Kundenauftrages, z. B. bei der Auftragsannahme ist in der Regel immer gleich hoch, egal ob es sich um eine größere oder kleinere Bestellmenge handelt.

Es zeigt sich, dass die Prozesskostenrechnung anderen Verfahren in Bezug auf die Genauigkeit der Kostenkalkulation überlegen ist. Daraus entsteht die Möglichkeit, zielgerichtete Verbesserungen einzuleiten. Für eine Losgrößenentscheidung sind zusätzlich, wie in den Kapiteln zwei und drei beschrieben *Ressourcen* von zentraler Bedeutung. Im Folgenden wird deshalb ein Verfahren vorgestellt, welches die Ressourcen ins Zentrum der Prozesskostenkalkulation rückt.

Fazit

Die Prozesskostenrechnung hilft dabei, Kostentreiber zu identifizieren. Durch die detaillierte Analyse von Prozessen liefert sie Hinweise, wo sich in den Abläufen in

Unternehmen Verbesserungspotenziale erschließen lassen. Effizienzsteigerungspotenziale an den Schnittstellen von und zwischen Prozessen werden sichtbar. Sie trägt dazu bei, Empfehlungen in Hinblick auf strategische und taktische Entscheidungen abzuleiten. Es ist anzunehmen, dass davon auch Losgrößenentscheidungen profitieren können. Untersucht werden muss, wie dies erfolgen kann.

4.3.1 Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung

Da Prozesskostenrechnungsverfahren genau jene Kenntnisse über die innerbetrieblichen Abläufe und insbesondere die Prozesse erfordern, die das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium liefert, wurde das Dortmunder Prozesskettenparadigma im Jahre 2005 durch eine ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung ergänzt [FUCHS 2005, S.59 ff.]. Dieses wird für die folgenden Betrachtungen erläutert und dann auf ihren Einsatz bei der Losgrößenermittlung hin überprüft.

Die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung erweitert den Prozesskostenrechnungsansatz um die zuvor geforderte Inanspruchnahme von Ressourcen durch Prozesse. Ein Prozess kann sich unterschiedlichster Ressourcen bedienen und diese in unterschiedlicher Weise auslasten, wodurch wiederum Kosten entstehen. Als Maßgröße gilt dabei der Durchsatz von Leistungsobjekten pro Zeiteinheit. Abhängig von der Ressourcenauslastung wird folgender Kostenzusammenhang unterstellt:

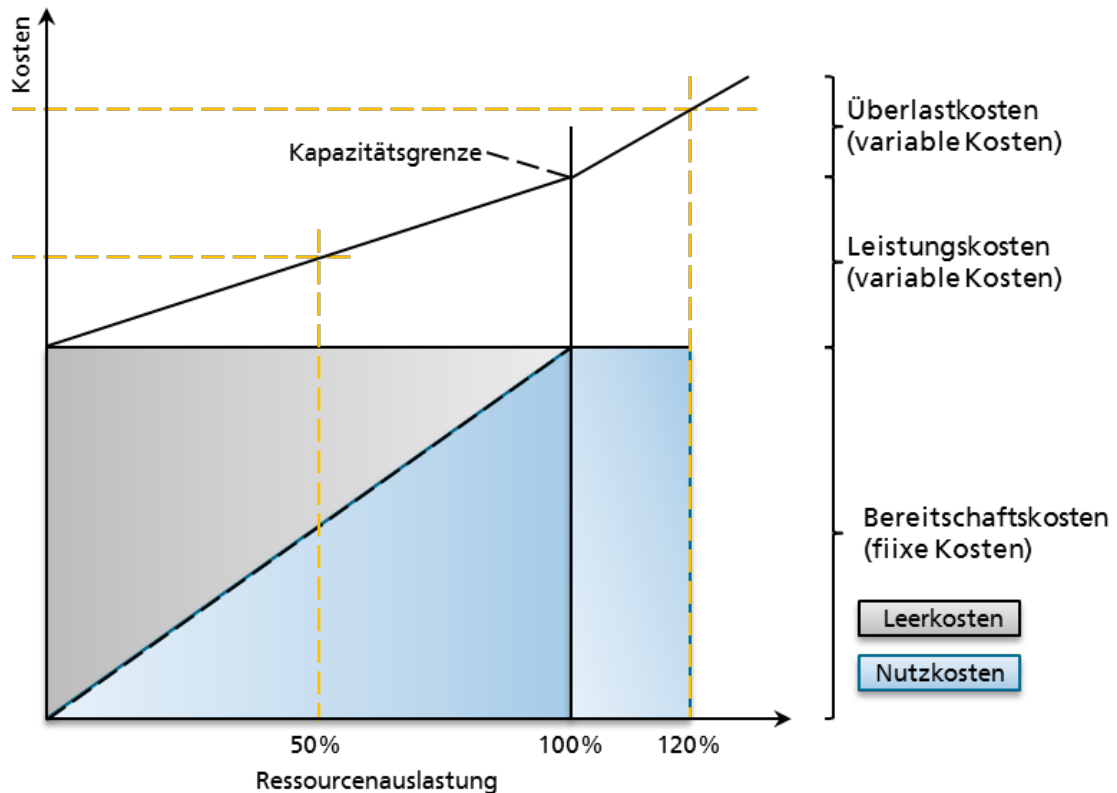


Abbildung 4-7: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Ressourcenauslastung

[WESTKÄMPER & ZAHN 2009, S.18; FUCHS 2005, S.63 f.]

Diagramm 4-7 zeigt die Ressourcenauslastung auf der Abszisse und die Kosten auf der Ordinate. Die Bereitschaftskosten sind als Summe der Nutz- und Leerkosten definiert. Mit steigender Ressourcenauslastung verändert sich das Verhältnis von Nutz- zu Leerkosten zugunsten der Nutzkosten, dies beeinflusst die Summe der Bereitschaftskosten jedoch nicht. Sie werden bildlich gesprochen als *Kostenblock* in die Rechnung einbezogen. Über dem Kostenblock der Bereitschaftskosten sind die Leistungskosten dargestellt. Sie variieren je nach Menge der Leistungsobjekte pro Zeiteinheit und folglich mit der Ressourcenauslastung. Wie dargestellt wird ihnen ein linearer Zusammenhang zur Ressourcenauslastung, bis hin zur Auslastungsgrenze unterstellt. Ab diesem Punkt werden die entstehenden Kosten als überproportional angenommen. Grund für eine Zunahme der Leistungskosten pro Stück bei Überschreiten der Auslastungsgrenze können beispielsweise höhere Personalkosten bei Überstunden oder Akkordarbeit sein.

Die Prozesskosten ergeben sich aus der Summe aller genannten Kostenarten. Diese sind in Diagramm 4-7 auf der sekundären Y-Achse aufgeschlüsselt. Die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung unterscheidet folglich Nutz-, Leer-, Bereitschafts-, Leistungs- und Überlastkosten. Darüber hinaus werden Grundbereitschaftskosten einbezogen. Grundbereitschaftskosten sind Kosten, die ohne Bezug zur Leistung eines Prozesses entstehen. Sie sind vergleichbar mit den

Gemeinkosten anderer Kostenrechnungssysteme, werden jedoch in diesem Kontext nicht vertieft, weil sie für Prozessvergleiche nicht relevant sind. Beispiele für Grundbereitschaftskosten sind Flächenkosten (z. B. für Umkleidekabinen) oder Energiekosten (z. B. für die Hallenbeleuchtung). Leistungskosten sind Kosten, die durch die unmittelbare Nutzung einer Ressource entstehen. Sie sind „abhängig von Anzahl und Umfang der durchzuführenden Prozesse“ [WEBER 1987, S.167]. Das Gegenstück dazu bilden die Bereitschaftskosten, wie bereits gezeigt. Bereitschaftskosten lassen sich, je nach Nutzungsgrad einer Ressource in Nutz- und Leerkosten aufteilen. In Abhängigkeit von der Auslastung ergeben sich die ressourcenorientierten Prozesskosten für eine Ressource zu:

$$K(A) = K_L + K_N + K_{Leer}$$

Fuchs erläutert ein vierstufiges Vorgehensmodell zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung. Es setzt sich aus den Bausteinen

- Modellentwicklung
- Modulation
- Kostenkalkulation und
- Analyse

zusammen [FUCHS 2005, S.65]. Im Gegensatz zu anderen Prozesskostenrechnungsverfahren geht die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung bei der Identifikation von Prozessen nicht von Tätigkeitsanalysen in den Kostenstellen aus. Das Modell greift die in Kapitel 4.1 beschriebene Vorgehensweise des Dortmunder Prozesskettenparadigmas auf.

Dazu wird das Prozesskettenmodell im ersten Schritt der *Modellentwicklung* erstellt, analysiert und parametrisiert. Während der Modellentwicklung muss außerdem die *logistische Basisgröße* festgelegt werden. Die logistische Basisgröße beschreibt das Objekt, durch dessen Transformation ein Prozess Ressourcen in Anspruch nimmt. Die logistische Basisgröße ist folglich von der Anzahl der Leistungsobjekte abhängig. Sie enthält in der Regel ein Vielfaches der Rohstoffe für ein Leistungsobjekt, wie beispielsweise eine Palette oder ein KLT oder entspricht der Anzahl der Einheiten in einem Kostenrechnungssystem. Für die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung ist es erforderlich Prozesse so weit zu untergliedern, dass einem Prozess eindeutig nur eine logistische Basisgröße zugeordnet werden kann. Damit wird die verursachungsgerechte Zuweisung der Kosten sichergestellt.

Im Anschluss an die Prozessvisualisierung und die Festlegung der logistischen Basisgröße erfolgen die Definition der erforderlichen Ressourcen und deren Zuordnung anhand von Leistungsfähigkeit, Zuständigkeitsbereich und Qualifikationen. Dazu werden die sechs knappen Betriebsmittel nach KUHN aufgegriffen: Personal,

Arbeitsmittel, Organisationsmittel, Arbeitshilfsmittel, Fläche und Bestand [KUHNS 1997, S.30 f., KRILL 1997, S.29]. Diese Variablen werden mit den Prozessen, bei denen sie in Anspruch genommen werden verbunden, wobei eine Ressource von unterschiedlichen Prozessen in Anspruch genommen werden kann. Durch die so genannte Leistungsfunktion wird der Ressourcenbedarf eines Prozesses festgelegt. Sie gibt den Zusammenhang von Leistungsobjekten pro Zeiteinheit vor. Denkbar sind beispielsweise konstante, sprungfixe, lineare und andere Ressourcenbedarfe. Ein Prozess- und Ressourcenmodell inklusive der Zuordnung von Ressourcen zu Prozessen ist das Ergebnis der Modellentwicklung.

In der zweiten Phase, der *Modulation* wird das Ressourcenmodell mit einer Systemlast von Leistungsobjekten belegt. Diese werden durch die Quellen während des Betrachtungszeitraums in die Prozesskette eingeschleust. Durch die mengenmäßigen Zusammenhänge, die in der Phase der Modellentwicklung festgelegt werden, können die Ressourcenbedarfe berechnet und das Ressourcenangebot aufgeteilt werden. Ist eine Ressource beispielsweise an zwei Prozessen beteiligt, so werden die Aktivitäten der Ressource im Betrachtungszeitraum aufsummiert und der Ressource zugeordnet. Da es sich um ein geschlossenes System handelt, verlassen die transformierten Leistungsobjekte das Modell über die definierten Senken. Werden Ressourcenangebot und Ressourcenbedarf gegenübergestellt, so können grundsätzlich drei Fälle unterschieden werden:

1. *Überkapazität* herrscht, wenn das Ressourcenangebot größer ist als die Nachfrage
2. *Überlast* entsteht, falls die Ressourcennachfrage größer ist als das Angebot
3. *Ausgeglichenheit* der Ressourcennachfrage und des -angebots, entspricht der idealen Betriebssituation

Aus Sicht der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung ist die verursachungsgerechte Zuweisung von Kosten erforderlich. Dazu ist im Falle von Überkapazität (Fall 1) entscheidend, dass die Leerkosten separat berechnet, dargestellt und ausgewiesen werden. Besteht Überlast (Fall 2) so muss die bestehende, insgesamt nicht ausreichende Kapazität auf die Ressourcennachfrage verteilt werden. Dazu schlägt Fuchs die „Verrechnung entsprechend der anteiligen Inanspruchnahme“ oder die „Verrechnung über Prozessprioritäten“ vor [FUCHS 2005, S.77 f.]. Die Verrechnung anhand der anteiligen Inanspruchnahme basiert auf der Annahme, dass mehrere Prozesse frei auf eine Ressource zugreifen können. Auf diese Weise wird die Ressource dann über 100 % ausgelastet. Im Falle der Verrechnung über Prozessprioritäten werden die Prozesse priorisiert und dürfen in dieser Reihenfolge auf Ressourcen zugreifen. Die Auslastung von 100 % kann dabei als Obergrenze festgelegt und eine weitere Auslastung abgewiesen werden. GÖPFERT weist in diesem Zusammenhang bereits

darauf hin, dass eine Ausgeglichenheit von Ressourcennachfrage und -angebot (Fall 3) nur durch eine idealisierte Betrachtungsweise erreicht werden kann, weil andere Optimierungsziele, wie beispielsweise Durchlaufzeitverringerungen und Bestandsreduzierungen der optimalen Betriebssituation (in diesem Sinne) im Wege stehen [GÖPFERT 2000, S.112].

Die Phase der Modulation belegt das Prozesskettenmodell mit einer Systemlast. Auf Basis der Systemlast können die Ressourcenverbräuche der Teilprozesse errechnet werden. Es entsteht das Kapazitäts- und Ressourcenangebot anhand der Inanspruchnahme der Prozesse. Außerdem werden Kapazitätsanpassungen und das Ausweisen von Leerkapazitäten erreicht.

Die dritte Phase der *Kostenkalkulation* rechnet den Ressourcenverbräuchen Kosten zu. Auf diese Weise wird der Zusammenhang zwischen der Leistungserstellung als Ursache und dem Ressourcenverbrauch als Maß für den Ressourcenverbrauch klar ersichtlich. Die Kostenkalkulation kann nach Fuchs in sechs Schritte untergliedert werden: [FUCHS 2005, S.79 f.]

1. Eingabe der Initialkosten
2. Festlegung der Ressourcenkostensätze
3. Berechnung der Leistungskosten
4. Berechnung der Nutz- und Leerkosten
5. Verrechnung der Grundbereitschaftskosten
6. Ermittlung der Prozesskosten

Mit den ersten beiden Schritten werden die Grundlagen für eine verursachungsgerechte Kostenrechnung gelegt. Im Anschluss daran (Punkte drei bis sechs) findet die eigentliche Kostenrechnung statt. Dabei umfassen die Initialkosten sämtliche Kosten, die vor dem Transformationsprozess entstehen. Sie umfassen beispielsweise Ladungsträger, deren Etikettierung oder die Herstellung der Chargenrückverfolgbarkeit. Sie müssen den einzelnen Produkten direkt zugeordnet werden, damit sie verursachungsgerecht in die Kostenrechnung einfließen.

Ziel bei der Festlegung der Ressourcenkostensätze ist ein Datensatz für jede Ressource, der alle ihre unterschiedlichen relevanten Kostenanteile enthält und transparent macht. Sie werden, wie in Darstellung 4-7 gezeigt, in Leistungs- und Bereitschaftskosten unterteilt. Auf dieser Basis kann die Berechnung der Leistungskosten erfolgen. Sie steht in unmittelbarem Zusammenhang zum Ressourcenverbrauch und wird direkt für den jeweiligen Teilprozess vorgenommen. Leistungskosten fallen demzufolge nur für Ressourcen an, die einen direkten Beitrag zur Wertschöpfung in einem Prozess liefern. Die Berechnung der Nutz- und Leerkosten weist aus, in welchem Umfang eine Ressource für Teilprozesse in Anspruch genommen wird. Gemäß den erläuterten drei

Fällen (optimale Auslastung, Über- und Unterkapazität) erfolgt die Gliederung in Nutz- und Leeranteile der Kosten.

Werden die Leerkosten verursachungsgerecht verrechnet, so kann folgende Formel zugrunde gelegt werden [FUCHS 2005, S.82]:

$$K_{Leer}(x) = BK_R * \left(1 - \frac{\sum_{x=1}^P RB_x}{RA_R} \right) * \frac{RB_x}{\sum_{x=1}^P RB_x}$$

BK	Bereitschaftskosten
RA	Ressourcenangebot
RB	Ressourcenbedarf
R	Ressourcenindex
X	Teilprozess
P	Summe aller Teilprozesse

Die Verrechnung der Grundbereitschaftskosten kann grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen, entweder durch die Zuweisung einzelner Teile der Grundbereitschaftskosten zu Teilprozessen, falls dies eindeutig möglich ist, oder über die anteilige Verrechnung zu Teilprozessen anhand eines Berechnungsschlüssels. Der erste Fall basiert auf dem Verursacherprinzip. Bei einer anteiligen Verrechnung besteht hingegen die Gefahr, nicht nach qualitativen Kriterien zu gewichten, sondern simplere Maßstäbe anzusetzen, wie etwa eine Verteilung zu gleichen Anteilen. Dies verzerrt häufig die Unternehmensrealität, die auf diese Weise nur in den wenigsten Fällen exakt wiedergegeben wird.

Ist die Vorgehensweise zur Verrechnung der Grundbereitschaftskosten festgelegt, erfolgt die Ermittlung der Prozesskosten durch Aggregation der Ressourcenkosten erst auf Teilprozess- und danach auf Prozessebene. Damit wird die Verbindung zwischen Ressourcenkosten und Prozessen geschaffen. Im Rahmen der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung ist ein Prozesskostensatz als die Summe der Prozesskosten pro Leistungsobjekt in einem Teilprozess definiert. Zu dessen Berechnung wird der Kostensatz des Teilprozesses wie oben beschrieben ermittelt und durch die Anzahl der Leistungsobjekte geteilt.

Im letzten Schritt, der Analyse, wird die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung zu einem prozessorientierten Controlling-Instrument ausgebaut. Dazu werden betriebliche Standardkennzahlen aus der Perspektive der Prozesse, der Ressourcen, der Kunden und Produkte ausgewertet. Auf diese Weise werden Standardkennzahlen mit den vier Perspektiven verknüpft. Zu den Standardkennzahlen gehören beispielsweise Durchlaufzeit, Bestand, Kosten pro Prozess, Ressourcenkostensätze, oder -auslastung. Welche Kennzahlen im Einzelnen betrachtet werden, ist je nach strategischer Ausrichtung des Unternehmens sehr unterschiedlich. Auf diese Weise erfolgt eine

robuste Planung, bei der verschiedene Szenarien erstellt, betrachtet und analysiert werden können [GAUSEMEIER ET AL. 2009, S.95]. Betrachtungen über unterschiedliche Perioden oder mit unterschiedlichen Produkten und Auslastungen werden ermöglicht. Zusätzlich zur reinen Kostenbetrachtung werden Finanzen als Ressource in die Betrachtung einbezogen, um Rentabilitätsbetrachtungen durchzuführen.

4.3.2 Prozesskostenrechnung in LogiChain³

Die Software LogiChain baut auf dem Prozessketteninstrumentarium auf und liefert eine EDV-Anwendung zur Darstellung von und zur Arbeit mit Prozesskettenmodellen [KUHN 1999, S.191 ff.].²⁸ Die Modellierung der Prozesskette erfolgt nach dem Drag-and-Drop-Prinzip in einer an Microsoft Visio angelehnten Benutzeroberfläche. Darüber hinaus bietet die mittlerweile vielfach weiterentwickelte Software LogiChain³ Funktionen zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung und Simulation der Quellen, Senken und Prozesse eines Prozesskettenmodells. Zur Berechnung und Modellierung bedient sie sich der in den vorherigen Kapiteln erläuterten Systematiken. LogiChain³ bietet nützliche Möglichkeiten zur Visualisierung und Modellierung von Prozessketten sowie zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung. Zudem ist das in den Kapiteln 4.1 und 4.3 beschriebene *Handwerkszeug* des Dortmunder Prozesskettenparadigmas in das Softwaresystem integriert.

Der Forschungsbereich der vorliegenden Arbeit fokussiert auf die Methodik zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung, weshalb nicht näher auf die Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten von LogiChain³ eingegangen wird. Analog zur in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Vorgehensweise liegt der Kostenrechnung eine umfassende Parametrierung der Prozesskette zugrunde. Sie baut auf dem Prozesskettendesign und der Ressourcenzuordnung auf und beginnt mit der Definition der Leistungsobjekte und ihrer zeitlichen Bezugsgrößen. Es ist jedoch wichtig, die Funktionsweise der Software genauer zu verstehen, um konkret auf die Berechnung der Prozesskosten eingehen zu können.

LogiChain³ bietet unterschiedliche Modellierungen und Simulationen der Unternehmensprozesse und greift dazu auf Abstraktionen zurück. Einige Prozesse, insbesondere Produktions- und Montageprozesse, besitzen durch ihre transformatorische Eigenschaft unterschiedliche Leistungsobjekte im Input als im Output. In der Regel besteht der Input dieser Prozesse aus mehreren unterschiedlichen Rohstoffen, die im Prozess zu einem fertigen Produkt, dem Output transformiert werden. Der eigentliche Transformationsvorgang wird im Softwaresystem LogiChain³

²⁸ Die folgenden Analysen beruhen auf der Anwendung und der Arbeit mit der Software LogiChain³. Für weitere Informationen siehe <http://www.logichain.com> und http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/unternehmensplanung/prozesskostenrechnung_logichain_software.html.

abgebildet und zwar mit Hilfe von Transformationsregeln, die einem Prozess zugeordnet werden. Transformationsregeln bestehen aus zwei Listen von gewichteten Leistungsobjekten, ähnlich Stücklisten, die auf der einen Seite Input- und auf der anderen Seite Output-Größen des Prozesses enthalten. Die Auswahl erfolgt in einem Drop-Down-Menü, welches alle angelegten Leistungsobjekte zeigt. Durch die Festlegung der Input-Objekte und deren Anzahl einerseits und des fertigen Leistungsobjekts andererseits wird bestimmt, welche Leistungsobjekte in welchen Output umgewandelt werden. Eine Transformationsregel kann folglich nur dann auf ein Prozesselement angewendet werden, wenn alle Input-Leistungsobjekte durch die Modulation für das Prozesskettenelement zugänglich gemacht wurden.

Durchlaufen ähnliche Leistungsobjekte die gleichen Prozesse, so können diese zu einem so genannten „Alias“ zusammengeführt werden. Auf diese Weise werden unterschiedliche Objekte in Prozessschritten gleich behandelt. Ein Alias ist somit ein stellvertretendes Leistungsobjekt, das verschiedene Leistungsobjekte zu einem übergreifenden Typ zusammenfasst. So lassen sich zum Beispiel Paletten und Transportboxen zu dem Alias „Ladehilfsmittel“ zusammenfassen und in einem Teilbereich der Prozesskette gleich behandeln. Liegt eine direkte Verbindung von Prozessen vor, oder ist an einem Konnektor nur eine Verbindung zum nächsten Prozess angegeben, so werden von LogiChain³ automatisch 100 % der Objekte des Alias zum nächsten Prozess weitergeleitet. Hat ein Prozessschritt jedoch mehrere Folgeprozesse, so werden die weiterzugehenden Mengen am Konnektor aufgeteilt. Folgen auf einen Verpackungsprozess beispielsweise zwei unterschiedlich lange dauernde Verladeprozesse (z. B. Überseecontainer-Verladung und eine Verladung auf Wechselbrücken), die von dem oben bereits beschriebenen Alias *Ladehilfsmittel* durchlaufen werden, so kann das Leistungsobjekt (bzw. der Alias) prozentual auf die beiden Folgeprozesse aufgeteilt werden. Sollte es erforderlich sein, so kann ein Alias anschließend wieder in seine Ursprungsbestandteile aufgeteilt werden.

Die Bearbeitungszeit der Prozesskettenelemente wird in Zeiteinheiten pro Bezugseinheit angegeben. So kann festgelegt werden, dass für eine Entladung 45 Minuten pro Bezugseinheit LKW benötigt werden. LogiChain³ liefert dazu einen Satz vorbereiteter Zeiteinheiten. Da diese Standardwerte nicht auf alle Anwendungsfälle und Kundenbedürfnisse anzuwenden sind, besteht die Möglichkeit, voreingestellte Einheiten zu ändern und neue hinzuzufügen. In dieser Arbeit wird zur exakten Angabe des zeitlichen Horizonts auf die Zeiteinheiten Sekunde, Minute und Stunde zurückgegriffen. Diese sind im Gegensatz zu einem *Arbeitstag* oder einer *Schicht* einheitlich lang.

Ist die Modellierung und Parametrierung abgeschlossen, so bietet LogiChain³ eine Fehlersuchfunktion an, die Inkonsistenzen im Modell aufdeckt und auf fehlende Eingaben hinweist. Diese Konsistenzprüfung umfasst:

- Anzeigen nicht gesetzter Einheiten
- Aufzeigen fehlender oder fehlerhaft gesetzter Werte
- Darstellung fehlerhafter oder doppelter Verbindungen
- Hinweise auf nicht verbundene Objekte
- Überprüfung der Prozesskette auf syntaktische (die Zusammenstellung und Anordnung betreffende) Korrektheit

So soll sichergestellt werden, dass alle wesentlichen Anforderungen für die Kostenberechnung abgedeckt sind. Die Berechnung der ressourcenorientierten Prozesskosten umfasst die Schritte *Systemlastberechnung*, die Berechnung des *Ressourcenbedarfs* und die Berechnung der *Ressourcenauslastung*. Der Ressourceneinsatz wird für die Kostenrechnung anschließend mit Kostenkennzahlen belegt. Auf diese Weise werden zu jedem Prozess die jeweiligen Kosten berechnet und im Modell dargestellt.

Die Prozesskosten PK in LogiChain³ setzen sich konkret als Summe der Nutz-, Leistungs- und Leerkosten der am Prozess beteiligten Ressourcen K zusammen:

$$PK_K = NK_K + LK_K + LrK_K$$

Werden Prozesskosten aufgeschlüsselt, so erhält man:

$$\begin{aligned}
 PK_k &= NK_k + LK_k + LrK_k = \\
 &= \sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] * \sum_{n \in N} [H(R^n) * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} \left[\frac{EinzSBK_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * \sum_{n \in N} \left[\frac{ArbZ_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * F(P^k, V^m) + \right. \\
 &+ \sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] * \sum_{n \in N} [H(R^n) * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} [LKS_n * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} \left[\frac{ArbZ_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * F(P^k, V^m) \right] + \\
 &+ \sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] * \sum_{n \in N} [H(R^n) * G(V^m, R^n)] * \right. \\
 &\left. * \sum_{n \in N} \left[\frac{E(R^n) * \left[(\#EinzRes)_n * Verf_n - \sum_{m \in M} (\#Res)_m * G(V^m, R^n) * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] \right]}{\sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * G(V^m, R^n) * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] \right]} * EinzSBK_n \right] * G(V^m, R^n) * F(P^k, V^m) \right]
 \end{aligned}$$

Da ein Hauptkriterium der Losgrößeroptimierung die Auslastung von Ressourcen und Prozessen ist, werden die Leerkosten im Folgenden vernachlässigt. Damit kann die oben angegebene Formel wie folgt vereinfacht werden:

$$\begin{aligned}
 PK_k &= NK_k + LK_k = \\
 &= \sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] * \sum_{n \in N} [H(R^n) * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} \left[\frac{EinzSBK_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * \sum_{n \in N} \left[\frac{ArbZ_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * F(P^k, V^m) + \right. \\
 &+ \sum_{m \in M} \left[(\#Res)_m * \sum_{k \in K} \left[\frac{SL_k}{LG_k} * BAZ_k * F(P^k, V^m) \right] * \sum_{n \in N} [H(R^n) * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} [LKS_n * G(V^m, R^n)] * \sum_{n \in N} \left[\frac{ArbZ_n}{Verf_n} * G(V^m, R^n) \right] * F(P^k, V^m) \right] +
 \end{aligned}$$

Zunächst lässt sich festhalten, dass die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung die Losgröße als Eingangsgröße verwendet. In der angegebenen Formel²⁹ geht sie sowohl in die Nutz- als auch in die Leistungskosten in der zweiten Summe ein. Sie wird in der

²⁹Die gleiche Beziehung der Losgröße und deren Auswirkungen auf den Formelverlauf gilt auch für die Leerkostenfunktion, um die die Prozesskostenformel vereinfacht wurde.

Kostenrechnung verwendet, um die Systemlast auf die einzelnen Bearbeitungslose aufzuteilen und diese über die Bearbeitungszeit auf die Ressourcen aufzuschlagen. Die Ressourcen werden durch die Funktion F einbezogen, die die Beziehung zwischen einem Prozesskettenelement und einem Ressourcenverbinder wie folgt ausdrückt:

$$F(P^k, V^m) := \begin{cases} 1 & \text{, falls } V^m \text{ mit } P^k \text{ " verbunden ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Durch Struktur der Formel mit der Stellung der Losgröße im Nenner der Prozesskostenfunktion gilt der Grundsatz: Je größer die Losgröße ist, desto geringer sind die Prozesskosten. Damit lässt sich festhalten, dass die Prozesskostenrechnung in dieser Form keine neuen Anhaltspunkte für die Losgrößeroptimierung liefert. Die Prozesskostenfunktion in Abhängigkeit von der Losgröße hat den gleichen degressiven Verlauf wie die Rüstkostenfunktion im klassischen Losgrößenmodell. Es wäre denkbar, eine Optimierung der Prozesskosten und der Lagerkosten, ähnlich dem klassischen Losgrößenmodell herbeizuführen. Diese Überlegung scheint jedoch aufgrund des Prozessgedankens und aus der Überlegung heraus, die Dinge im Fluss zu halten, für diese Arbeit nicht zielführend.

In den letzten Jahren zeigt sich ohnehin eine Abkehr von Verfahren, bei denen ausschließlich eine einstufige Kostenoptimierung herbeigeführt wird. Vielmehr werden (wie in Kapitel 2 gezeigt) weitere Kriterien, wie beispielsweise Flexibilität oder Durchlaufzeiten in Optimierungen einbezogen.

Fazit

Prozesskostenrechnungsverfahren und insbesondere die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung, verwenden die Losgröße als Eingangswert. In der Gesamtkosten- und der Rüstkostenfunktion steht die Losgröße im Nenner, woraus sich deren degressiver Verlauf in Abhängigkeit von der Losgröße ergibt.

Es gilt die Maxime: „Je größer die Losgröße, desto kostengünstiger der Prozess“.

Die klassischen Losgrößenverfahren unterstellen diese Beziehung bereits. Sie stellen die Rüstkostenfunktion der Lagerkostenfunktion gegenüber, um ein Kostenoptimum zu erreichen. Die Prozesskostenrechnung liefert diesbezüglich also keine neuen Anhaltspunkte für eine Losgrößeroptimierung, weil die Rüst-, bzw. Prozesskostenfunktion den gleichen Verlauf hat, wie die Rüstkostenfunktion im klassischen Losgrößenmodell. Es wäre denkbar eine Optimierung der Prozesskosten und der Lagerkosten, ähnlich dem klassischen Losgrößenmodell herbeizuführen. Dies widerspricht jedoch dem Prozessgedanken und dem Streben, die Dinge im Fluss zu halten.

4.3.3 Indirekte Kostenoptimierung durch Verschwendungsvermeidung

In der Management Praxis resultieren Kostenoptimierungen häufig indirekt aus der einer Strategie der Verschwendungsvermeidung. Das Lean Management bedient sich dazu der in Kapitel 3.3 beschriebenen Techniken und Verfahren. Wird die Losgrößeroptimierung als Regelungsmechanismus zur Verschwendungsvermeidung verstanden, so kann die These aufgestellt werden, dass eine Losgröße dann sinnvoll gewählt ist, wenn sie die Verschwendung in der gesamten Prozesskette minimiert. Um dies zu untersuchen, werden einige der gängigsten Prozesse genauer betrachtet. Im Kontext dieser Arbeit sind die häufigsten Prozessarten einer Prozesskette:

- Produzieren (inkl. Montieren)
- Transportieren
- Prüfen
- Lagern
- Rüsten
- Verpacken / Versandvorbereitung
- Instandhaltung
- Planen
- Steuern

Diese Prozesse können in die Kategorien operative und organisatorische Tätigkeiten gegliedert werden. Die operativen Prozesse lassen sich auf die grundsätzlichen Tätigkeiten *Bearbeiten*, *Transportieren* und *Lagern* zurückführen [PAETZ 1986, S.88; WIENDAHL ET AL. 1996, S.24]. Durch die Skalierbarkeit der Modellierung können die Prozesse auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus, wie beispielsweise Anlagenebene, Produktionsebene, oder Supply Chain Ebene betrachtet werden. Hier werden Losgrößenentscheidungen sehr häufig durch technische Gegebenheiten eingeschränkt oder determiniert. Beispiele dafür sind Losgrößen, die durch

- Produktionsmittel (Gesenk, Spannvorrichtung, Batchverfahren, etc.)
- Transportmittel (LKW-, Schiffs-, Kessel-, Wagenladung)
- Verpackungseinheiten (Palette, Gitterbox, Box, KLT, Karton, etc.)
- Lagerorte (Silo, Bunker, Shelter, Castor)
- Bestellmengen (Mindestbestellmenge, Tonne, Kilo, etc.)

vorgegeben werden. Diese sind in der Regel nur geringfügig variabel, können aber für eine Losgrößeroptimierung wertvolle Anhaltspunkte geben. So werden in der Praxis häufig Vielfache von technischen Losgrößen ausgewählt. Die organisatorischen Prozesse *Planen* und *Steuern* greifen diese Informationen auf und stimmen sie aufeinander ab.

Der Planungsprozess findet dabei in der Regel vor und zum Teil während des Durchlaufens einer Prozesskette statt. Er legt die Grundlage für eine verschwendungsarme und agile Prozesskette. [WESTKÄMPER & ZAHN 2009, S.213 ff.] Losgrößenoptimierungen zielen deshalb in erster Linie auf organisatorische Prozesse und in zweiter Linie auf technische Gegebenheiten ab.

Um zu analysieren, welche Prozesse besonders für welche Art der Verschwendung anfällig sind und wie Losgrößenentscheidungen als Regelungsmechanismus zur Verschwendungsvermeidung eingesetzt werden können, werden die angeführten Prozesse den Verschwendungsarten des Toyota-Produktionssystems aus Kapitel 3.3 gegenübergestellt. NEUGEBAUER weist im Zuge eines solchen Vergleichs darauf hin, dass „man sich nicht zu leichtfertigen Analogieübertragungen verleiten lassen“ sollte [NEUGEBAUER 2014, S.45]. In dieser Arbeit wird im Schwerpunkt analysiert, wie Losgrößenveränderungen zur Verschwendungsvermeidung beitragen können, weiterführende, übertragende Ansätze werden dabei nicht weiter verfolgt.

Die folgende Tabelle stellt die Bestandteile einer Prozesskette den Verschwendungsarten aus dem TPS gegenüber. In den Spalten der Tabelle 4-8 sind die eingangs genannten Bestandteile einer Prozesskette aufgeführt, während sie den Verschwendungsarten aus dem TPS in den Spalten der Tabelle gegenübergestellt sind:

	Über- produktion	Bestand	Warten	Bewegung	Transport	Fehler	Über- Bearbeitung
Produktions- prozess		X	X	X		X	X
Transport- prozess			X		X	X	X
Prüf- prozess		X	X	X	X		X
Lager- prozess		(X)	X		X		
Rüst- prozess			X	X			
Verpackungs- prozess			X	X			X
Instandhaltu- ngsprozess		X	X			X	X
Planungs- prozess	X	X	X				X
Steuerungs- prozess	X	X	X		X		X

Abbildung 4-8: Die sieben Arten der Verschwendung bezogen auf Losgrößenentscheidungen in unterschiedlichen Prozessen.

Auf Basis einer qualitativen Analyse³⁰ geben die Korrelationen in den Feldern der Tabelle wieder, ob und in wie weit ein Prozess für eine Verschwendungsart anfällig ist. Zunächst fällt auf, dass „Warten“ durchgängig als Verschwendungsrisiko klassifiziert

³⁰Projektbezogene, signifikante Erfahrungswerte, die in den Abteilungen 210 und 250 des Fraunhofer IML erarbeitet wurden.

wurde. Wird darüber hinaus der Planungs- und Steuerungsprozess fokussiert, so sind „Überproduktion“ und „Bestand“ die bedeutendsten Verschwendungsarten.

In der Praxis werden unterschiedliche Losgrößen verwendet. Diese beruhen jedoch bei Prozessen außerhalb der Produktion in der Regel aus technischen Restriktionen. Für eine Losgrößenentscheidung in einer Prozesskette muss die klassische, produktionsseitige Ermittlung der Losgröße weiter gefasst und um zusätzliche Prozesse erweitert werden. Ergänzend zur Verschwendung durch Überproduktion fällt auf, dass Losgrößenentscheidungen wesentlich beeinflussen, wie lange Prozesse aufeinander warten müssen. In Bezug auf eine Losgrößenbetrachtung in einer Prozesskette muss folglich eine Abstimmung der Losgrößen von Prozess zu Prozess erfolgen. Nur so können die wesentlichen Verschwendungsarten und insbesondere Zeitverschwendung vermieden werden.

Fazit

Um zu gewährleisten, dass Optimierungen in der betrieblichen Praxis kosteneffizient erfolgen, werden häufig indirekte Senkungen der Kosten mittels Verschwendungsvermeidung vorgenommen. Für Losgrößenoptimierungen konnte gezeigt werden, dass die Verschwendungsarten Warten, Überproduktion und Bestand kritisch zu bewerten sind und in einem Losgrößenverfahren besonders berücksichtigt werden sollten.

4.4 Das Primat der Rüstkostenminimierung über die Flexibilität unter Verwendung der Kundennachfrage

Um den drei Säulen Modellierung, Flexibilität und Kostenoptimierung im Rahmen der Losgrößenoptimierung gerecht zu werden und eine Methodik zur Ermittlung der Losgröße auf Prozessebene zu entwickeln, ist eine Formel alleine unzureichend. Vielmehr wird eine Systematik benötigt, welche die drei Faktoren aufgreift und zu einer Vorgehensweise vereint.

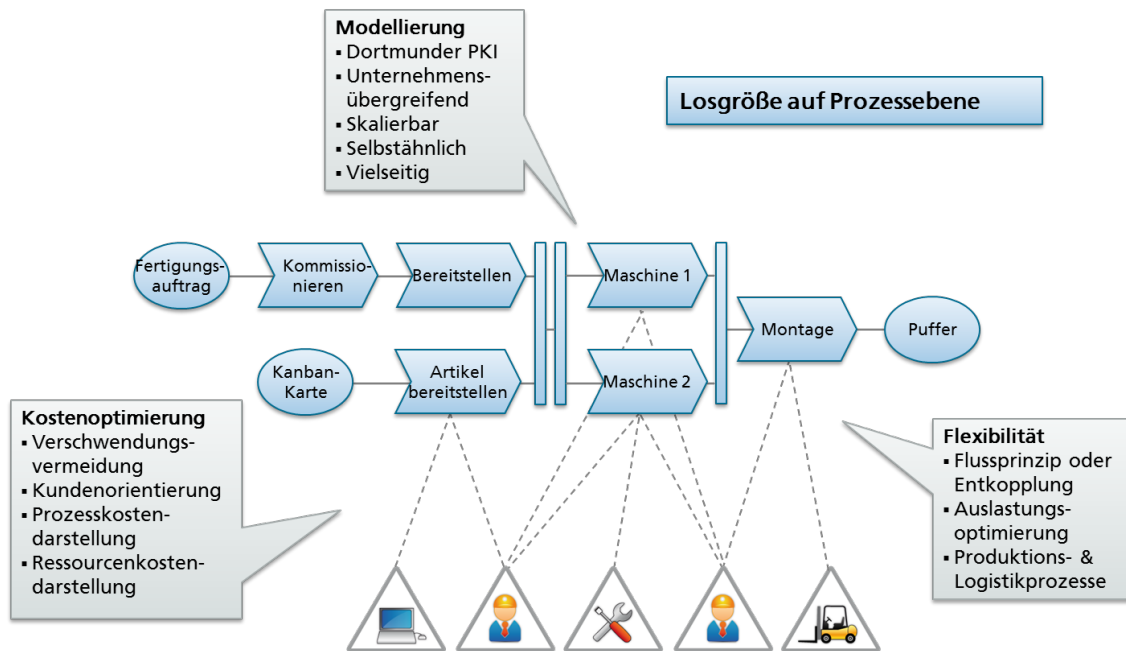


Abbildung 4-9: Methodik zur Losgrößeroptimierung auf Prozessebene

Wird in Anlehnung an WIENDAHL (Kapitel 4.3.3) davon ausgegangen, dass Prozesse auf den Grundtätigkeiten Bearbeiten, Transportieren und Lagern beruhen, so sollte eine Losgrößenermittlung nach Möglichkeit für Bearbeitungs- und Transportprozesse anwendbar sein. Das ermöglicht, dass die Prozesse entlang der Wertschöpfungskette in Bezug auf die Losgröße aufeinander abgestimmt oder durch Puffer- bzw. Lagerprozesse voneinander entkoppelt werden. Flexible und gut eingebettete Transportprozesse bieten zusätzliche Möglichkeiten die Prozesskette auf Basis der Losgröße zu harmonisieren.

Diese Arbeit bedient sich dafür eines allgemeinen Losgrößenverfahrens mit einem Nivellierungsfaktor und der umfassenden Modellierung durch das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium. In diesem Kapitel wird zunächst auf das Berechnungsverfahren und anschließend auf die Modellierung eingegangen. Das hat den Vorteil, dass die Berechnungssystematik in die Modellierung einbezogen und damit weiter zu einem Gesamtsystem entwickelt werden kann.

4.4.1 Entwicklung eines Nivellierungsfaktors zur Losgrößenermittlung

Das Losgrößenverfahren besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird ein Nivellierungsfaktor berechnet, der im zweiten Schritt mit der Nachfrage des Kundenprozesses multipliziert wird. Wird analog zur Vorgehensweise bei der Wertstrommethode (Kapitel 4.1.1) vom Endkunden ausgehend rückwärts(-schreitend) vorgegangen, so erfolgt die direkte Abstimmung der Prozesskette anhand der Kundennachfrage.

Es handelt sich um eine zeitliche Betrachtung, welche die Gesamtbearbeitungszeit der von einem Prozess verlangten Varianten in Bezug zur verfügbaren Kapazität setzt. Der Nivellierungsfaktor wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$NF = \frac{\sum_{i=1}^n BZ}{(\#Ress * V * AZ) - \sum_{i=1}^n PWZ}$$

Die zeitliche Inanspruchnahme für alle Varianten bei Losgröße eins wird dabei auf die täglich zur Verfügung stehende Produktionszeit bezogen. Rüstzeiten werden dabei vollständig und als Gesamtheit vom Ressourcenangebot abgezogen. So wird das Ressourcenangebot in erster Linie in Produktivitätszeit aufgeteilt und erst in zweiter Linie für Umstellungs- bzw. Einrichtungsvorgänge verwendet. Der Nivellierungsfaktor stellt daher die Produktivitätszeit (im Sinne des *Bearbeitens*) eines Prozesses besonders in den Vordergrund.

Im zweiten Schritt des Berechnungsverfahrens wird der Nivellierungsfaktor mit der Nachfragemenge des Kundenprozesses multipliziert. Dazu wird der Kundentakt verwendet, der angibt, in welchem Tempo ein Prozess arbeiten sollte, um den (durchschnittlichen) Bedarf zu decken. Auf diese Weise werden Verkaufs- und Produktionstakt miteinander synchronisiert [ERLACH 2010, S.48]. Aus dem Kundentakt wird die tägliche Nachfragemenge des Kundenprozesses berechnet und der Nivellierungsfaktor mit dieser multipliziert. Das erfordert in der Regel eine sehr detaillierte Betrachtungsweise, da die Nachfragemengen immer auf Leistungsobjekte bezogen sind, die von Prozess zu Prozess unterschiedlich sein können (siehe Kapitel 4.1.2).

So wird Überproduktion vermieden, weil der Prozess durch das Pull-Prinzip mit dem vorhergehenden Kundenprozess verbunden ist. Wird diese Vorgehensweise auf die gesamte Prozesskette angewendet, so determiniert der jeweilige Bedarf der Endkunden den einzelnen Prozess. Daraus resultiert der zusätzliche Vorteil, dass die Bedarfsmengen über Prozesse hinweg nivelliert werden.

$$d = \frac{\text{Jährliche Kundennachfrage}}{\text{Anzahl Arbeitstage pro Jahr}}$$

Werden Prozesse entlang einer Prozesskette aufeinander abgestimmt, kann es erforderlich sein, vom *durchschnittlichen* täglichen Kundenbedarf abzuweichen. Ein Prozess zur Produktionsversorgung sollte beispielsweise auf die maximale Geschwindigkeit des Kundenprozesses ausgelegt werden, damit die Prozesssicherheit hergestellt werden kann und der Produktionsprozess nicht stillgelegt werden muss, weil er nicht ausreichend versorgt wird.

Als prozessorientierte Losgröße ergibt sich:

$$LG_{Prozess} = NF * d = \frac{\sum_{i=1}^n BZ}{(\#Ress * V * AZ) - \sum_{i=1}^n PWZ} * d$$

Die Losgröße bezieht sich auf Leistungsobjekte, die im Prozess bearbeitet, bzw. transformiert werden das bedeutet, dass eine detaillierte Betrachtung des Prozesses an sich, sowie seiner technischen Fähigkeiten und darüber hinaus der Prozesskette erforderlich ist. Bevor das Losgrößenverfahren durch die Modellierung mit dem Dortmunder Prozessketteninstrumentarium in den Gesamtzusammenhang eingebettet werden kann erfolgt die Diskussion der möglichen Ergebnisse des Verfahrens und deren Einflüsse auf einzelne Prozesse.

4.4.2 Diskussion der Ergebnisse des Nivellierungsfaktors

Betrachtet man den Nivellierungsfaktor mathematisch, so lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

- Fall 1: Nivellierungsfaktor > 1
- Fall 2: Nivellierungsfaktor = 1
- Fall 3: Nivellierungsfaktor < 1
- Fall 4: Nivellierungsfaktor < 0

Ist der Nivellierungsfaktor größer Null (Fall 1-3), so ist das Ressourcenangebot größer als die erforderliche Rüstzeitensumme für einen Produktionszyklus. Das bedeutet, dass es möglich ist, alle Varianten an einem Tag einzurüsten. Dies kann im Einzelnen bedeuten:

Der Nivellierungsfaktor ist größer 1 (Fall 1), wenn der Zähler des Bruches größer ist als der Nenner. Das bedeutet, dass die Inanspruchnahme der Prozesszeit größer ist als die täglich zur Verfügung stehende Kapazität.

Beispielhaft seien einem Prozess zehn Produktvarianten zugeordnet, die er bearbeiten soll. Die Produktwechselzeit betrage unabhängig von der Wechselreihenfolge 15 Minuten. Die Bearbeitungszeit betrage (ebenfalls unabhängig von der Variante)³¹ 90 Minuten pro Stück. Der Prozess sei mit einem Kapazitätsangebot im Zweischichtbetrieb ausgestattet, was abzüglich der Pausenzeiten 15 Stunden betrage. Der Prozess weise außerdem über eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 80 Prozent auf. In diesem Fall beträgt die Rüstzeitensumme, um das gesamte Produktspektrum jeweils einmal einzurüsten 2,5 Stunden.

Durch Einsetzen in die Formel des Nivellierungsfaktors ergibt sich:

$$NF = \frac{10 * 90 \text{ Min}}{(1 * 0,8 * 15h) - 2,5h} = \frac{15h}{9,5h} = 1,58$$

³¹Die Bearbeitungszeit muss für die Anwendbarkeit und Validität des Verfahrens nicht gleich sein. Sie wurde lediglich zugunsten der Einfachheit des Beispiels als gleich angenommen.

In der Praxis könnte dies beispielsweise ein Fräsprozess sein, der auf einem CNC Bearbeitungszentrum in einer Werkstattfertigung durchgeführt wird. Dadurch, dass der Nivellierungsfaktor größer als eins ist, wird der Prozess mit Hilfe des Losgrößenverfahrens so ausgelegt, dass die Losgröße dem 1,58 fachen der Kundennachfrage im Folgeprozess entspricht.

Der Nivellierungsfaktor nimmt den Wert 1 an (Fall 2), wenn Nenner und Zähler des Bruches gleich groß sind. Das bedeutet, dass die Inanspruchnahme von Prozesszeit gleich der täglich zur Verfügung stehenden Kapazität ist. Damit wird die Losgröße entsprechend der Kundennachfrage gewählt.

Im oben angegebenen Beispiel würde das passieren, wenn die Bearbeitungszeit auf 57 Minuten sinken würde oder die Anlagenverfügbarkeit und die Arbeitszeit steigen würden. Das heißt, dass das Verhältnis von Prozesszeit zu Kapazität zugunsten der Kapazität steigt. In diesem Falle ist der Prozess in der Lage, exakt die Nachfragemenge des Folgeprozesses zu erstellen.

Das Ergebnis des Nivellierungsfaktors ist kleiner 1 (Fall 3), wenn der Zähler kleiner ist als der Nenner. Das bedeutet, dass die Inanspruchnahme von Bearbeitungszeit in einem Zyklus mit der Losgröße eins geringer ist als die täglich zur Verfügung stehende Kapazität. Somit verlagert sich das Verhältnis von Bearbeitungszeiten zu verfügbarer Zeit zugunsten der verfügbaren Zeit. Kleinere Losgrößen sind demzufolge möglich, falls der Tagesbedarf mit den anfallenden Rüstzeiten zu bewältigen ist.

Beispielhaft seien einem Prozess wiederum zehn Produktvarianten zugeordnet, die er bearbeiten soll. Die Produktwechselzeit betrage unabhängig von der Wechselreihenfolge 15 Minuten. Die Bearbeitungszeit (ebenfalls unabhängig von der Variante) acht Minuten pro Stück. Der Prozess sei mit einem Kapazitätsangebot im Zweischichtbetrieb ausgestattet, der abzüglich der Pausenzeiten 15 Stunden betrage. Der Prozess verfüge außerdem über eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 89 Prozent. Die Rüstzeitensumme des gesamten Produktspektrums jeweils betrage demnach 2,5 Stunden.

Durch Einsetzen in die Formel des Nivellierungsfaktors ergibt sich:

$$NF = \frac{10 * 2,5 \text{ Min}}{(1 * 0,89 * 15h) - 2,5h} = \frac{0,42h}{10,85h} = 0,04$$

In der Praxis könnte dies beispielsweise ein Montageprozess sein, der in einer Endmontagelinie durchgeführt wird. Dadurch, dass der Nivellierungsfaktor bedeutend kleiner als eins ist, wird der Prozess mit Hilfe des Losgrößenverfahrens so ausgelegt, dass die Losgröße exakt der des Kundenprozesses entspricht. Sollte das nicht gewünscht sein kann die Losgröße bis zum 0,04- fachen des Tagesbedarfs der Kundennachfrage im Folgeprozess reduziert werden.

Ein negatives Ergebnis des Nivellierungsfaktors (Fall 4) tritt praktisch nur dann ein, wenn die Summe der Rüstzeiten größer als die tägliche Verfügbarkeit ist. Damit wird die Differenz im Nenner des Nivellierungsfaktors negativ und folglich sein Gesamtergebnis auch. Dies sollte als direkter Indikator dienen

- die Rüstzeiten des Prozesses kritisch zu hinterfragen,
- die Variantenanzahl eines Prozess zu diskutieren und ggf.
- auf mehrere Ressourcen zurückzugreifen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das hier vorgestellte Losgrößenverfahren nicht für biologische oder chemische Produktionsverfahren oder die Prozessindustrie entwickelt wurde. Sind Produktwechselzeiten von mehr als einem Tag nicht unterschreitbar, so sollte ein anderes Betrachtungsintervall gewählt werden um die Losgröße nach diesem Verfahren zu ermitteln.

Beispielhaft seien einem Prozess wiederum zehn Produktvarianten zugeordnet, die er bearbeitet werden sollen. Die Produktwechselzeit betrage unabhängig von der Wechselreihenfolge einen Tag (1.440 Minuten). Die Bearbeitungszeit (ebenfalls unabhängig von der Variante) 5 Stunden (300 Minuten) pro Stück. Der Prozess sei mit einem Kapazitätsangebot im Zweischichtbetrieb ausgestattet, der abzüglich der Pausenzeiten 15 Stunden betrage. Außerdem verfüge der Prozess über eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 89 Prozent. Die Rüstzeitensumme beträgt dann 10 Tage.

Bevor die Ergebnisse des Nivellierungsfaktors allgemeiner diskutiert werden, wird er zusätzlich beispielhaft auf einen Logistikprozess angewendet:

Ein Flurförderzeug sei mit einem Transportanhänger ausgestattet, um von einer Produktionslinie Fertigteile in einen Verpackungsbereich zu transportieren. In diesem Falle sei das *Bearbeiten* der reine Transport der Fertigteile. Der Prozess sei in der Lage alle 68 Produktvarianten zu transportieren. Zum Transport anderer Fertigteile muss jedoch die Vorrichtung auf dem Transportanhänger gewechselt werden, was im Durchschnitt fünf Minuten pro Leistungsobjekt dauert. Die Transportzeit beträgt vier Minuten pro Leistungsobjekt, bei einer Verfügbarkeit von 98 Prozent und einer täglichen Arbeitszeit von sieben Stunden. Der Nivellierungsfaktor nimmt in diesem Fall den Wert 3,8 an. Im Folgeprozess, dem Verpacken, seien die Produkte einzeln zu bearbeiten. Folglich werden diesem Prozess immer vier Fertigprodukte zur Verfügung gestellt.

Es ist zusätzlich zu den oben genannten Fällen möglich, dass der Nenner des Nivellierungsfaktors gleich null wird. Das bedeutet, dass die Produktwechselzeiten für einen Zyklus genau der verfügbaren zeitlichen Kapazität entsprechen. In diesem Fall ist es ratsam die zeitliche Kapazität zu hinterfragen und ggf. anzupassen. Dies kann

beispielsweise mit dem hinterlegten Schichtmodell oder durch die Verfügbarkeit des Prozesses geschehen.

Untersucht man den Nivellierungsfaktor in Bezug auf Abhängigkeiten von sich ändernden Variablen, so lassen sich Gesetzmäßigkeiten herausstellen:

- Der Nivellierungsfaktor ist linear von der Summe der Bearbeitungszeiten abhängig, das bedeutet, je größer die Summe der Bearbeitungszeiten für einen Prozess, desto größer ist der Nivellierungsfaktor (wenn alle anderen Parameter gleich bleiben).
- Je größer die Produktwechselzeit (je geringer die Flexibilität eines Prozesses) desto größer ist der Nivellierungsfaktor. Genauer gesagt, nimmt die Funktion des Nivellierungsfaktors in Abhängigkeit von der Produktwechselzeit bis zum Schwellenwert, an dem der Nenner gleich Null wird einen exponentiellen Verlauf. Ab dem Schwellenwert (der von den anderen Parametern abhängig ist) verläuft sie logarithmisch. Abbildung 4-10 zeigt diesen Verlauf.³²

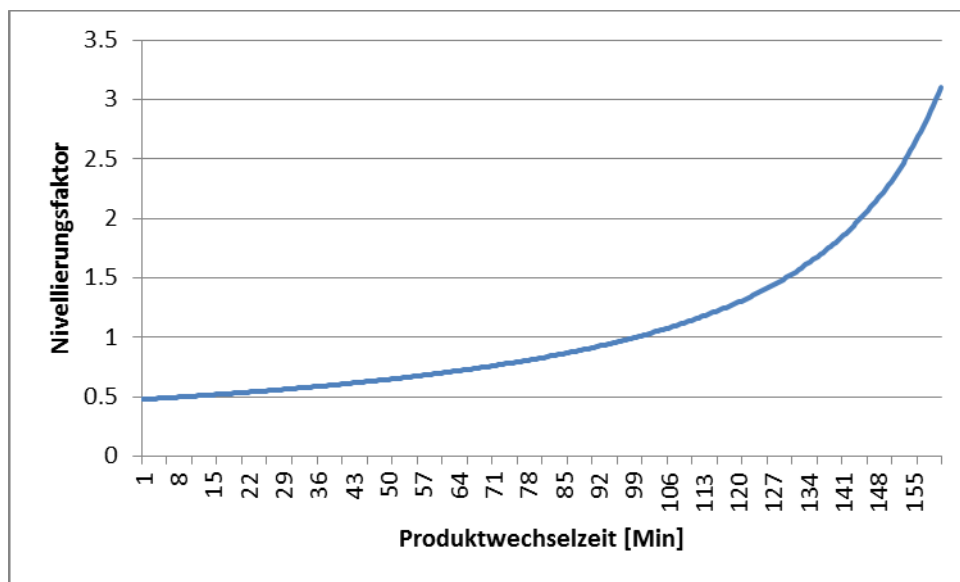


Abbildung 4-10: Abhängigkeit des Nivellierungsfaktors von der Produktwechselzeit

Abbildung 4-10 zeigt den steigenden Verlauf des Nivellierungsfaktors mit steigender Produktwechselzeit. Durch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren steigt die Losgröße folglich mit sinkender Flexibilität eines Prozesses an. Dies wird als *Primat der Rüstkostenminimierung über die Flexibilität* bezeichnet.

Ziel des Verfahrens ist es, die Losgröße auf den täglichen Bedarf des Kunden(-prozesses) auszulegen. Ist das nicht gewollt oder möglich, so gibt das Verfahren eine

³²Die Datentabelle mit den Parametern zum gezeigten Verlauf des Nivellierungsfaktors ist im Anhang angegeben.

Prozesslosgröße vor. Der Nivellierungsfaktor kann als Messgröße zur Ausrichtung der Prozessleistung auf die Kundennachfrage verwendet werden und gibt die relevanten Einflussgrößen für eine Optimierung vor. Diese berücksichtigt die vier Kriterien Flexibilität, Kosten, Prozessintegration und Kundennachfrage. Weitere Glättungen der Losgröße über Prozessschritte hinweg können aufgrund von technischen Restriktionen oder gewollter organisatorischer Anforderungen notwendig sein. Im Rahmen der praktischen Anwendung des Losgrößenverfahrens in Kapitel 5 wird diesbezüglich eine Glättung der Prozesslosgröße anhand von Transport- und Verpackungsgrößen näher betrachtet.

Es sei angemerkt, dass die angeführten Beispiele lediglich exemplarisch einzuordnen sind und es sich jeweils nur um punktuelle, einstufige Berechnungen handelt. Erweitert man den Betrachtungsbereich und schließt sämtliche Ressourcen und Prozesse einer Prozesskette ein, so erfordert dies eine umfassende Modellierung sowie eine prozessübergreifende Abstimmung. Das vorgestellte Verfahren unter Berücksichtigung des Nivellierungsfaktors ist auf eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Prozesse anwendbar. In den in diesem Kapitel angeführten Beispielen geht es primär darum die Vorgehensweise der Losgrößenermittlung zu erläutern. Die Auswirkungen des Verfahrens auf mehrere Prozessschritte und die damit auftretenden Nivellierungen werden erst deutlich, wenn das Verfahren, wie im folgenden Kapitel gezeigt, auf eine Prozesskette angewendet wird.

4.4.3 Modellierung der Prozesskette

Um eine umfassende und standardisierte Modellierung bei der Losgrößenoptimierung zu erreichen, wird aus den in Kapitel 4.1.2 erarbeiteten Gründen das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium verwendet. Die Modellierung der Prozesskette wird dabei als wesentliche Säule der Losgrößenermittlung verstanden, ohne die eine integrative und abgestimmte Losgrößenermittlung auf Prozessebene nicht möglich ist.

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert, bildet die Darstellung von Material- und Informationsflüssen in Form von Prozesskettenplänen die Basis des Prozessketteninstrumentariums. Durch die Dokumentation von Aktivitäten in einem Prozesskettenplan entsteht ein Modell, das unternehmensinterne und -übergreifende Prozesse in Form von Material- und Informationsflüssen entlang einer Wertschöpfungskette darstellt. Bei dieser Dokumentation stützt das Prozessketteninstrumentarium den Anwender mit Freiheitsgraden bezogen auf den Detaillierungs- und Abstraktionsgrad aus [KUHN & HELLINGRATH 2002, S.95]. Eine gängige Vorgehensweise ist es, zunächst einen übergeordneten so genannten Masterprozess zu umreißen und danach detaillierter auf bestimmte Teilbereiche und Einzelheiten einzugehen. Im Masterprozess werden Losgrößen in der Regel noch nicht

analysiert, jedoch wird der Betrachtungshorizont für die Analyse und Optimierung ausgewählt.

Um eine Prozesskettendarstellung zu erzeugen, die eine Losgrößenoptimierung an der Prozesskette erlaubt, werden die Prozesskettenelemente ablauflogisch – und dementsprechend auch chronologisch gegliedert – entlang der Zeitachse zu einer Prozesskette zusammengesetzt [WINZ & QUINDT 1997, S.17]. Prozessschleifen und Rückflüsse innerhalb einer Prozessfolge werden ausgeschlossen, weil mit ihnen die geforderte zeitliche Konsistenz nicht eingehalten werden kann. Demzufolge werden repetitive Prozesse, falls dies erforderlich ist, mehrfach hintereinander im Prozesskettenplan dargestellt. Auf diese Weise wird leicht ersichtlich, dass diese Prozesse besonders zeit- und ressourcenverbrauchend sind [KUHN 1995, S.47]. Ein repetitiver Prozess ist beispielsweise das Ausprobieren, welches Ladehilfsmittel das am besten geeignet ist, oder oder das wiederholte Eingeben der Losgröße bei der Programmierung von Produktionsmaschinen, was aufgrund von Softwarefehlern erforderlich ist.

Konkret sind dafür die Folgenden standardisierten und selbständigen³³ Modellbausteine des Dortmunder Prozessketteninstrumentariums erforderlich:

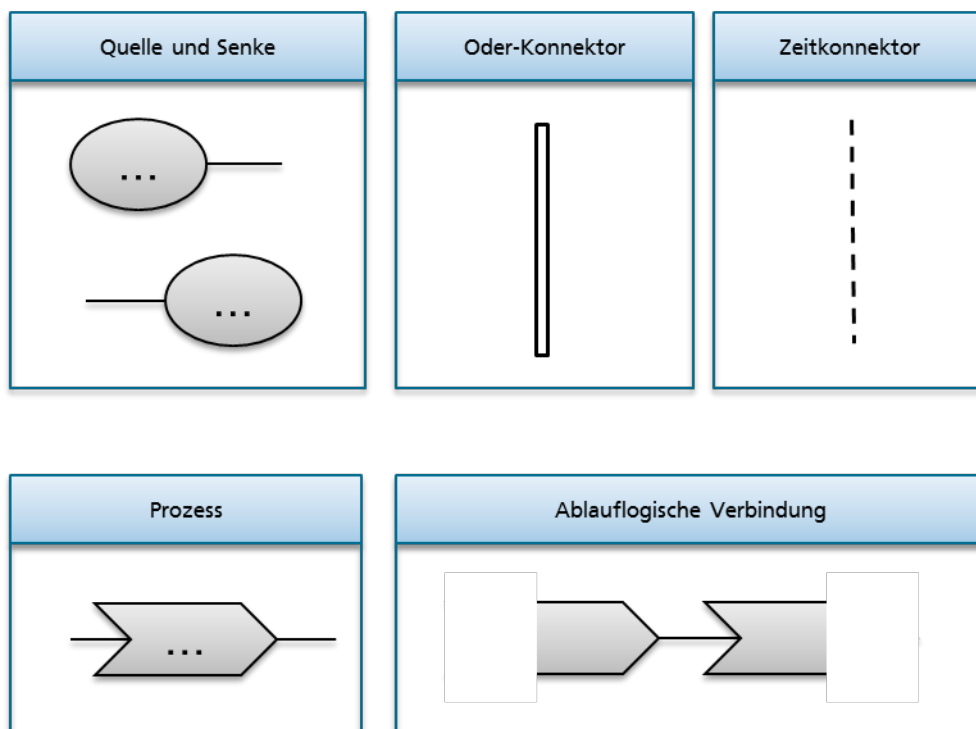


Abbildung 4-11: Modellbausteine des Dortmunder Prozessketteninstrumentariums
[WINZ & QUINDT 1997, S.54]

³³Selbstständigkeit bezeichnet „die Eigenschaft sich wiederholender Strukturen auf unterschiedlichen Systemebenen“ [BENGER 2007, S.104]. Siehe Kapitel 4.1.2.

Quellen sind die Eingänge von Prozessketten. Sie stellen Prozessen somit Leistungsobjekte zur Verfügung, wie beispielsweise Informationen und Materialien [PIEŁOK 1995, S.45]. Leistungsobjekte werden in Lose unterteilt und durchlaufen die Prozesskettenelemente zur Leistungstransformation. Quellen stellen somit nicht nur die Ursprünge der Leistungsobjekte dar, sondern auch deren Art und Durchsatz. Sie legen folglich die Systemlast fest, die als Anzahl der Leistungsobjekte pro Zeiteinheit definiert ist [KUHN 1995, S.43]. Anhand der Verfahrensweise werden *aktive* und *passive Quellen* unterschieden. Aktive Quellen funktionieren nach dem *Push*-Prinzip und führen der Prozesskette je nach Systemlast Basisobjekte zu. Die Zuflussregulierung funktioniert nach einer festgelegten Regel, wie beispielsweise einem fixen Zyklus von Leistungsobjekten pro Zeiteinheit. Eine Regulierung anhand der Auslastung von Prozessen findet dabei nicht statt. In der Simulation dieses Szenarios mit der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Software LogiChain³ würde dies zu Zeitverzögerungen im Ablauf führen. Passiven Quellen liegt im Gegensatz dazu das *Pull*-Prinzip zugrunde. Das bedeutet, dass einem Prozesskettenelement Leistungsobjekte nur bei Bedarf im Folgeprozess zugeführt werden [KUHN 1995, S.43]. Diese Steuerung wird durch definierte Ereignisse im Folgeprozess ausgelöst, wie beispielsweise die Informationsübermittlung eines Kundenbedarfs oder die Auslastungsunterschreitung anhand eines Schwellenwertes.

Senken beschreiben die Ausgänge von Prozesskettenelementen und geben die transformierten Basisobjekte wieder an die Umwelt ab. Stellt die Senke nicht das Ende einer Prozesskette dar, kommt ihr zusätzlich die Funktion der Quelle für das nachfolgende Prozesskettenelement zu. Die Senke eines Prozesses hat in diesem Fall auch die Aufgabe, den Bedarf des Folgeprozesses zu decken [PIEŁOK 1995, S.47]. Quelle und Senke stellen die Außenbeziehungen einer Prozesskette dar und sind für den Austausch von Leistungsobjekten zwischen den Prozessen, Teilprozessketten und den Schnittstellen des Modells zu seiner Umwelt, verantwortlich.

Ablauflogische Verbindungen stellen den Fluss von Leistungsobjekten zwischen zwei Modellelementen dar. Im Modell verursachen sie per Definition weder einen Zeit- noch einen Ressourcenverbrauch. Gleiches gilt für Konnektoren, die eine Verzweigung von Objektflüssen oder eine Zusammenführung darstellen [WINZ & QUINDT 1997, S.55 f.]. Für die Modellierung können verschiedene logische Verknüpfungen erforderlich sein. Diese sind in Abbildung 4-2 dargestellt:

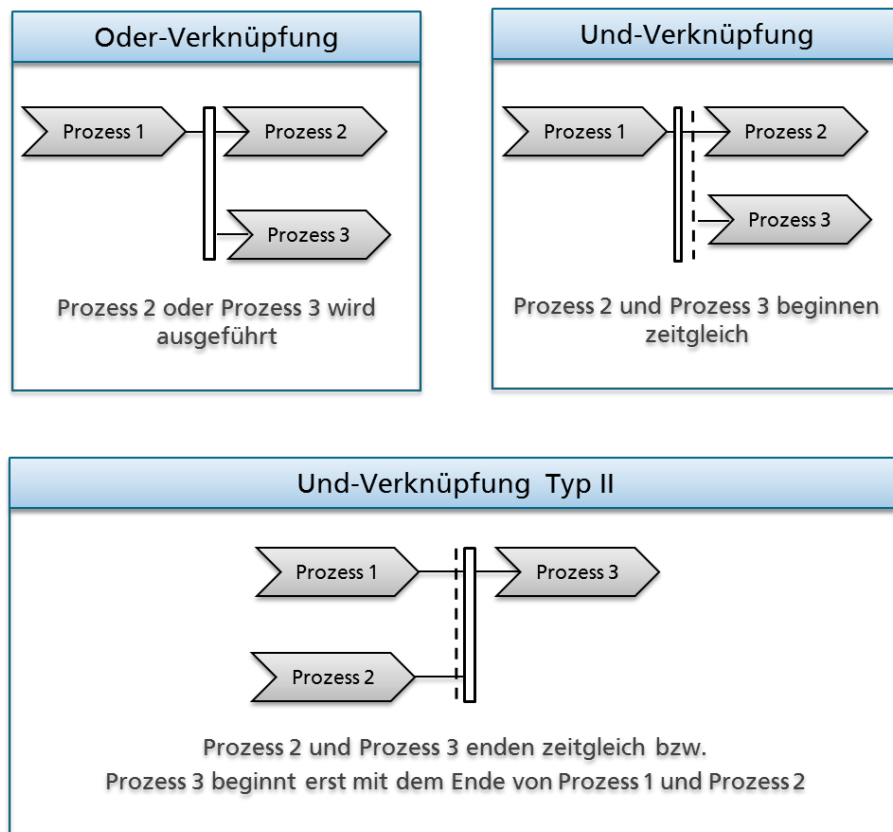


Abbildung 4-12: Verknüpfungstypen im Dortmunder Prozessketteninstrumentarium [WINZ & QUINDT 1997, S.56]

Abbildung 4-12 zeigt, dass die verschiedenen Verknüpfungstypen durch Kombination des Zeitkonnektors mit dem Oder-Konnektor entstehen. WINZ und QUINDT halten folgende Eigenschaften fest [WINZ & QUINDT 1997, S.56]:

- Konnektoren besitzen mindestens einen Eingang und einen Ausgang
- Die Summe von Ein- und Ausgängen beträgt mindestens drei

Demzufolge kann ein Konnektor auch mehr als drei Prozesse miteinander verknüpfen. Die in Kapitel 4 gezeigten 17 Potenzialklassen (Abbildung 4-5) eines Prozesskettenelements, die aus den Modellierungsebenen des Prozesskettenelements abgeleitet werden, sind Quellen und Senken, Prozesse, Lenkung, Ressourcen sowie Strukturen. [KUHN 1995, S.47] Durch sie wird eine einheitliche Modellierung ermöglicht. Nachdem die Prozesskettenelemente und deren Verbindungen erläutert wurden, wird die Bedeutung der Potenzialklassen im Folgenden benutzt, um den Einsatz bei der Ermittlung der Losgröße auf Prozessebene zu erläutern:

Ressourcen

Innerhalb eines Prozesses werden Leistungsobjekte vom definierten Eingangszustand in den Ausgangszustand überführt. Um dies und die erforderliche Leistungstransformation zu erreichen, greifen Prozesse auf Ressourcen zurück. Diese lassen sich in personelle,

technische und informationstechnische Ressourcen unterteilen. Kuhn spezifiziert die Ressourcen auf die *sechs knappen Betriebsmittel der Logistik* und unterscheidet somit die Ressourcentypen Personal, Fläche, Bestand, Arbeitsmittel, Arbeitshilfsmittel und Organisationshilfsmittel [KUHN 1995, S.45 f.; PIELOK 1995, S.73]. Der Ressourcenverbrauch korreliert in der Regel direkt mit den Prozesskosten. Aus Kosten- und Nachhaltigkeitsgründen ist demzufolge ein sparsamer Ressourceneinsatz anzustreben [WINZ & QUINT 1997, S.21; PIELOK 1995, S.73]. Ressourcen geben technische Restriktionen der Losgrößenermittlung vor. Sie sind darüber hinaus entscheidend, um die in Kapitel 4.2 geforderte Flexibilität zu erreichen. Dabei kommt es vor allem auf schnelle Umrüstzeiten an. Ihnen gilt in der Modellierung und bei der Losgrößeroptimierung besondere Aufmerksamkeit. Mit der Darstellung im Dortmunder Prozessketteninstrumentarium, können Potenziale in Bezug auf die an der Prozesskette beteiligten Ressourcen erschlossen werden. Auch Engpässe werden sichtbar und können somit verschoben oder optimiert werden.

Lenkungsebene

Die Lenkungsebene liefert Regeln und Steuerungsvorschriften für Prozesse im unternehmensinternen und -übergreifenden Umfeld. Im Rahmen von Prozessen entstehen gewollte und ungewollte Entscheidungsspielräume. Diese werden durch Regelungen und Steuerungsvorschriften der *Lenkungsebene* in das Gesamtsystem eingebunden und auf den Gesamterfolg ausgerichtet. Insbesondere wenn aufgrund der Freiheitsgrade Einfluss auf vor- und nachgelagerte Prozesse sowie auf über- und untergeordnete Instanzen ausgeübt werden kann, sind klare Regelungen erforderlich [WINZ 1996, S.25]. Die Steuerungsvorschriften der Lenkungsebene gliedert Kuhn in fünf hierarchisch organisierte Bereiche [KUHN 1995, S.56]:

- Normative
- Administration
- Disposition
- Netzwerk
- Prozesssteuerung

Die *Normative* legt als oberste Ebene allgemeine Normen, Werte und Ziele fest. In ihr spiegeln sich Unternehmenskultur und -philosophie wider. Die Ebene der *Administration* bildet die Kommunikation und die Organisation der Beziehungen zur Außenwelt ab. An dieser Stelle werden Losgrößenentscheidungen getroffen. Durch die Skalierbarkeit des Ansatzes sind unterschiedliche Betrachtungsbereiche für Losgrößenentscheidungen möglich. Deren Auswirkungen müssen auf die gesamte Prozesskette abgestimmt werden [BECKMANN 2010, S.172 ff.]. Als Ebene mit den meisten Schnittstellen zur Systemumwelt ist es im Zuge der Normative auch wesentlich, Veränderungen in der Systemumwelt wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Durch

die Entwicklungen rund um *Industrie 4.0* und die immer besser werdende, übergreifende Vernetzung von Prozessen und Unternehmensgrenzen, kommt der normativen und administrativen Ebene eine besondere Bedeutung zu. Es müssen über Wertschöpfungsketten und Unternehmensnetzwerke hinweg Normen und Strategien entwickelt werden, innerhalb derer die einzelnen Akteure partnerschaftlich und eigenverantwortlich agieren können. [KUHN 1995, S.13 ff.; BECKMANN 1994, S.45 ff.]

Die *Disposition* ist für die Verwaltung und Verarbeitung von Kundenaufträgen zuständig. Sie koordiniert den Ressourceneinsatz unter Beachtung von Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Lieferterminen und Optimierungskriterien, wie beispielsweise eine Reduzierung der Durchlaufzeit. Die *Netzwerk-Ebene* lenkt, koordiniert und synchronisiert Prozesse, die zusammengenommen in der Lage sind, komplexe Aufgaben autonom zu erfüllen [KUHN 1995, S.54 ff.]. Die *Prozesssteuerung* als unterste Ebene beinhaltet Ablauf- und Steuerregeln in Bezug auf die (physische) Transformation eines Basisobjekts. In den durch die übergeordneten Ebenen festgelegten Grenzen sind Prozesssteuerungsverantwortliche auch hier in der Lage, autonome Entscheidungen zu treffen. [PIELOK 1995, S.61 ff.]

Strukturen

Strukturen verbinden die Prozesskettenelemente mit den Organisationseinheiten von Unternehmen. Unternehmensstrukturen sind wie in Kapitel 3 beschrieben in der Regel maßgeblich durch das Layout, das heißt die Anordnung von Flächen, Gebäuden und Maschinen geprägt sowie deren Einteilung in Abteilungen, Bereiche und Hierarchieebenen (Aufbauorganisation). Dazu kommt die technische Kommunikationsstruktur, die sich aus Rechnernetzen, Buchungskreisen, Telefonnetzen, Datenstrukturen, etc., zusammensetzt [PIELOK 1995, S.84]. Diese Strukturen sind zwar in hohem Maße unflexibel, jedoch grundsätzlich änderbar [KUHN 1995, S.107]. Gemäß der Leitlinie: „Funktionsorientierung folgt Ablauforientierung“ von GAITANIDES, die in Kapitel 3 erläutert wurde, stellt diese Umorientierung bei bestehenden Strukturen eine der größten Herausforderungen dar.

Da sich Prozess- und Unternehmensstrukturen gegenseitig bedingen, muss im Sinne einer prozessorientierten Auftragsabwicklung eine sukzessive Umgestaltung der Strukturelemente eines Unternehmens erfolgen. Strukturen sind so zu gestalten, dass sie Prozesse unterstützen und nicht behindern [KUHN 1995, S.103]. Das gilt in besonderem Maße auch für Losgrößenentscheidungen. Die logische Verknüpfung zwischen Prozessen und der Unternehmensstruktur ermöglicht es, dass Prozessketten, zur Veranschaulichung der Transportwegeoptimierung, in einen Plan des Layouts übertragen werden können [PIELOK 1995, S.83]. Zudem kann dargestellt werden, welche Hierarchie- bzw. Funktionsebenen eine Prozesskette beinhaltet. Dies ist für die Losgrößenoptimierung ebenfalls sehr förderlich und wird bei der praktischen

Anwendung in Kapitel 5 genutzt. Die von HENKE und TEN HOMPEL festgestellte „Trennung von normativer und operativer Entscheidungsebene“ von wird durch die Potenzialklassen der Modellierung im Dortmunder Prozessketteninstrumentarium begünstigt [TEN HOMPEL & HENKE 2014, S.617]. Zentrale Entscheidungswege können aufgespalten werden und stattdessen einzelne Prozesse mit Regeln zur Losgrößeroptimierung durch das beschriebene Verfahren versehen werden.

4.4.4 Flexibilität durch Losgrößeroptimierung

In Bezug auf die Modellierung ist die Losgrößeroptimierung auf Prozessebene durch das Dortmunder Prozessketteninstrumentarium sehr flexibel. Unterschiedlichste Wertschöpfungsketten aller Industriezweige und sämtliche Prozesse können abgebildet werden. Der Fokus liegt also im Gegensatz zu anderen Verfahren nicht auf Produktionsprozessen. Darüber hinaus werden keine Einschränkungen in Bezug auf die zu betrachtenden Leistungsobjekte oder den Betrachtungshorizont gemacht. Modellierung und Berechnung gehen gleichermaßen vor und erlauben deshalb eine sehr große Flexibilität. Darüber hinaus kann die Losgrößenbetrachtung durch die Skalierbarkeit der Modellierung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen erfolgen.

Bei der Losgrößeroptimierung anhand des Nivellierungsfaktors und der Kundennachfrage im Folgeprozess wird die Flexibilität als Kriterium zur Losgrößenermittlung als wichtige Zielgröße verwendet. Zunächst wird bei der Berechnung des Nivellierungsfaktors von der Losgröße eins ausgegangen. Zusätzlich wird der Kundenbedarf in die Betrachtung einbezogen und der Nivellierungsfaktor so gewählt, dass kleine Losgrößen entstehen.³⁴ Die Flexibilität wird durch das Primat der Kostenoptimierung über die Flexibilität, dabei aber nicht mehr an die oberste Stelle der Optimierung gestellt. Die Berechnung geht von Losgröße eins pro Variante aus, ist jedoch durch das Primat der Rüstzeitoptimierung über die Flexibilität mit einer oberen Schranke versehen. Auf diese Weise erhalten die Kriterien, Rüstzeitminimierung und Kostenoptimierung automatisch mehr Gewicht. Damit sind eine entkoppelte Betrachtung einzelner Prozesse, sowie die integrierte Abstimmung der Losgrößen über die Prozesskette hinweg möglich. Überträgt das Management die Verantwortung der Losgrößenentscheidung an einzelne Prozesse, so können im Zuge dessen dezentrale Losgrößenentscheidungen auf Basis aktueller Parameter getroffen werden. Dazu ist jedoch Transparenz der Entscheidung für die anderen Prozesse erforderlich. Die in Kapitel 4.4.3 beschriebene Modellierung muss die Losgrößenentscheidung anderen Prozessen in Echtzeit übermitteln und diese darstellen.

³⁴Damit wird er der Forderung der Prozessorientierung nach „kleinen Produktionslosen“ gerecht, siehe Kapitel 3 und [TAKEDA 2012, S.68 ff.].

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Losgrößenermittlung stellt die Optimierung von Kosten folglich über das Kriterium Flexibilität. Damit setzt es die Flexibilität in einen Bezugsrahmen, wie er in Kapitel 4.2 als Ziel formuliert wurde.

4.4.5 Kostensenkung durch Losgrößenoptimierung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Losgrößenoptimierung auf Prozessebene bedient sich der Techniken der prozessorientierten Unternehmensführung und überträgt diese auf sämtliche Prozesse entlang der Wertschöpfungskette. Wird es als ganzheitliche Methode zur Prozesskettenverbesserung verstanden, so enthält das Verfahren direkte und indirekte Methoden zur Kostenoptimierung. Die Kostenoptimierung erfolgt bereits auf Prozessebene und ermöglicht somit dezentrale und autonome Regelungen und Steuerungen, weil einzelne Prozesse anhand klar definierter Parameter beeinflusst und optimiert werden können. Diese werden durch eine konsequente, umfassende Anwendung auf die gesamte Prozesskette bezogen.

Das Primat der Kostenoptimierung über die Flexibilität anhand des Nivellierungsfaktors sieht darüber hinaus eine Kostenbegrenzung vor, um die Flexibilität bei der Losgrößenermittlung zu beschränken. Auf diese Weise wird die Flexibilität als wichtige Säule der Losgrößenoptimierung beibehalten, aber im Gesamtsystem begrenzt. Letztendlich steht das wirtschaftliche Handeln im Vordergrund und beschränkt die Flexibilität.

Durch die konsequente Ausrichtung der Prozesse auf den Bedarf des Kunden wird Überproduktion vermieden. Außerdem ist es weiterhin möglich, mit dem Nivellierungsfaktor und dem Bedarf des Kundenprozesses eine Losgröße als Eingangsgröße für die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung generieren. Sie hilft dann, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, bei der verursachungsgerechten Kostenbewertung und -analyse. Dazu bildet sie ab, wie stark einzelne Prozesse das Leistungsangebot unterschiedlicher Ressourcen in Anspruch nehmen. Unter Hinzunahme der Software LogiChain³ (siehe Kapitel 4.3.2) sind darüber hinaus übersichtliche Modellierungen und Simulationen unterschiedlichster Szenarien möglich.

Insgesamt umfasst die vorgestellte Methodik damit nicht nur die Losgrößenermittlung auf Prozessebene, sondern auch Optimierungen von Auftragsdurchlaufzeiten, Ressourcenauslastung sowie Nutz-, Leer- und Leistungskosten in Abhängigkeit veränderbarer Systemlasten.

Fazit

Die umfassende Modellierung mit dem Dortmunder Prozessketteninstrumentarium liefert die Grundlage für die Berechnung der Losgröße auf Prozessebene. Durch die

zweistufige Vorgehensweise mit dem Nivellierungsfaktor und seiner Multiplikation mit der Kundennachfrage wird eine verschwendungsarme und flexible Losgrößenermittlung ermöglicht, die dann auf die gesamte Prozesskette angewendet werden kann. So werden die drei Säulen der Losgrößeroptimierung Modellierung, Flexibilität und Kostenoptimierung für die Losgrößenentscheidung verwendet.

Darüber hinaus wird die von TEN HOMPEL und HENKE festgestellte „Trennung von normativer und operativer Entscheidungsebene“ im Rahmen der Industrie 4.0 durch die Potenzialklassen der Modellierung im Dortmunder Prozessketteninstrumentarium begünstigt. Zentrale Entscheidungswege können aufgespalten werden und stattdessen einzelne Prozesse mit Regeln zur Losgrößeroptimierung auf Basis des beschriebenen Verfahrens versehen werden.

5 Praxisbezogene Anwendung der Losgrößenbildung auf Prozessebene

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Losgrößenoptimierung ist nicht auf einzelne Prozessschritte oder Prozessarten – wie beispielsweise Produktionsprozesse – beschränkt und bietet daher sehr vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Um es einzusetzen, ist jedoch eine umfassende Modellierung der Unternehmensprozesse und eine Analyse ihres Zusammenspiels bezüglich der Kriterien Flexibilität und Kosten erforderlich. Losgrößen für eine Prozesskette aufeinander abzustimmen, erfordert deshalb in der Regel eine sehr detaillierte Betrachtungsweise.

Ein möglicher Bezugsrahmen für eine solch detaillierte Analyse ist beispielsweise ein PFEP-Planungsansatz. Der PFEP Ansatz – *Plan for Every Part* – bekommt zunehmend mehr Bedeutung für Optimierungsprojekte in den Bereichen Produktion und Logistik. Plan for Every Part Vorgehensweisen wird ein hohes Problemlösungspotential in Bezug auf die übergreifende Materialflussplanung und einen ganzheitlichen Lean Management Ansatz zugeschrieben. [MARTICHENKO & GRABE 2010, S.33]

In seiner ursprünglichen Ausprägung geht es bei einem PFEP-Projekt darum, alle Zukaufteile, die in die Produktion einfließen zu betrachten, um sowohl ein umfassendes Verständnis über die Teile an sich, als auch über deren Bedarfe und Verbräuche zu erlangen. Dieser Ansatz gewinnt zunehmend an Popularität, denn aufgrund seiner vielseitigen Verwendbarkeit können Projekte mit sehr unterschiedlichem Fokus mit Hilfe des PFEP realisiert werden. Im Folgenden wird ein Leitfaden skizziert, wie mit dem PFEP Ansatz eine Materialfluss- und Werkstrukturplanung durchgeführt und damit sämtliche Materialflüsse vom Wareneingang über Lagerung, Produktion und Versand der Fertigteile strukturiert und auf Teilebasis geplant werden können. Dies dient als Daten- und Modellierungsgrundlage für die praktische Anwendung der Losgrößenoptimierung auf Prozessebene.

„PFEP is a collection of all the relevant parts information in one place making the information visible to everyone” [HARRIS 2004, S.1]. Plan for Every Part ist also wörtlich zu nehmen und beschreibt eine Planungsmethode, bei der jedes einzelne Teil, das in der Produktion benötigt wird, einzeln betrachtet und geplant wird. Aus diesem Grunde erfordert PFEP Kenntnisse über die geometrischen und physikalischen Eigenschaften aller Roh-, bzw. Zukaufteile im Betrachtungsbereich. Je nach Fokus des Projekts werden jedoch weitere Teileinformationen relevant und müssen zusätzlich erhoben werden. In der Regel sind Teileinformationen, wie Abmessungen, Gewicht, Biegsamkeit, bzw. Faltbarkeit, Lieferantenverpackung, Mindestbestellmenge, Lieferant uvm. zwingend erforderlich. Zusätzlich spielen Handhabungsstrategien, wie das Umpacken vor oder nach der Lagerung, Produktionsmengen,

Produktionsversorgungsstrategien und -routen sowie Teilebedarfe basierend auf Produktionsplänen und Stücklisten eine wesentliche Rolle. Diese Informationen müssen für jedes Teil erhoben und zu einer PFEP Datenbasis zusammengestellt werden. Sie sind wesentlicher Bestandteil zur Erreichung verschwendungsarmer Prozesse [GÜNTNER ET AL. 2013, S.17 ff.]. Die Datenbeschaffung der Teilestammdaten ist erfahrungsgemäß in hohem Maße vom Grad der Lieferantenintegration abhängig. Je besser die Kommunikation mit den Lieferanten, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass viele der benötigten Stammdaten zuverlässig aus einem ERP-System, oder anderen Datenbanken erhoben werden können. Hier ist die bedeutendste Fehlerquelle des PFEP Ansatzes, weil die Datenerhebung für die Planung zwingend erforderlich ist und die Planungsergebnisse davon abhängig sind. Um Fehler zu vermeiden gibt allerdings eine denkbar simple Lösung: Fotos der Teile helfen bei Plausibilitätsprüfungen und sind insbesondere bei kritischen³⁵ Teilen oftmals sehr nützlich. Ist es nicht möglich auf Teiledaten zuzugreifen, sieht der PFEP Ansatz vor, die Daten jedes einzelnen Teils manuell zu erheben. Das bedeutet, dass die Teile beschafft, ausgelagert, ausgepackt, vermessen, gewogen, fotografiert und ggf. noch weiteren Schritten unterzogen werden müssen. Dies erfordert in der Regel einen sehr hohen Aufwand, kann durch eine geeignete Clusterung der Artikel jedoch vereinfacht werden.

In einem PFEP Ansatz geht es allerdings nicht in erster Linie um die Teileinformationen an sich, sie sind vielmehr ein Mittel zum Zweck, um Analysen durchzuführen und diese zu einem entscheidungsunterstützenden Werkzeug zusammen zu fassen. Aus diesem Grund gibt es kein vollständiges oder standardisiertes Tool zur Durchführung eines PFEP Projekts. CONRAD und ROOKS fassen zusammen: „the data needed and the format can be highly specific to your operation“ [CONRAD & ROOKS 2010]. Es empfiehlt sich deshalb, das PFEP-Planungstool parameterbasiert zu gestalten. So kann der Datenstamm an die Produktionsprozesse, Logistikströme und die beabsichtigten Verfahren in jedem einzelnen Anwendungsfall angepasst werden. Gängige Parameteranpassungen betreffen dabei die Produktionsvolumina, Schichtpläne, Lagerreichweiten und vieles mehr.

Zur Materialflussplanung und insbesondere zur Werkstrukturplanung reicht ein zahlenbasiertes Planungstool allein jedoch nicht aus [CAMARINHA-MATOS & AFSARMANESH 2008, S.7]. Eine Verknüpfung aus den oben angeführten Daten mit den physischen Gegebenheiten in einem Werk, Lager oder Distributionszentrum muss geschaffen werden. Dazu wird in der folgenden Abbildung 5-1 ein Verfahren vorgestellt, welches diese Schritte integriert und einen Bezugsrahmen für eine PFEP Vorgehensweise in Materialflussplanungs- und Werkstrukturprojekten liefert. Die

³⁵Kritisch bezogen auf die Gesamtleistungserstellung, im Sinne von zeitaufwändig, teuer, schwer wieder zu beschaffen, etc.

Losgrößenoptimierung auf Prozessebene, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurde findet sich darin in den Schritten vier bis acht wieder:

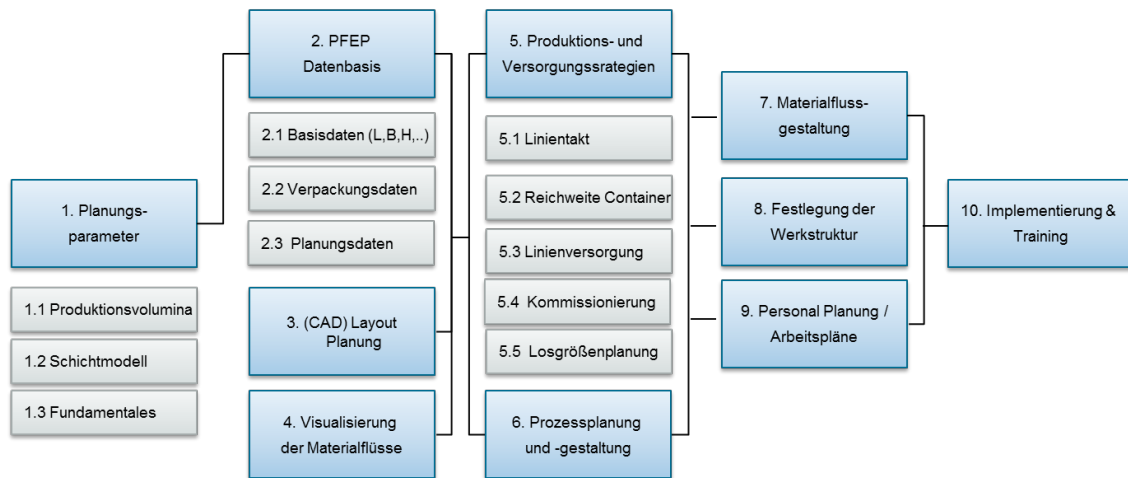


Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Fabrik- und Prozessplanung auf Basis des PFEP- Ansatzes [PETERS ET AL. 2014, S.39]

Die Abbildung zeigt einen 10-Punkte-Plan, der zur Werkstruktur und Produktions- sowie Logistikplanung auf Basis des PFEP Ansatzes genutzt werden kann.³⁶ Auf diese Weise wird der Fokus auf die in einem Werk ablaufenden Wertschöpfungsprozesse gelegt.

Im ersten Schritt wird bereits die parametrisierte Vorgehensweise angewendet, um später flexibel auf unterschiedliche Szenarien und Änderungen eingehen zu können. Ein zentrales Dokument bei dieser Vorgehensweise ist das PFEP-Planungstool. Es setzt bei der in Schritt 2 geschaffenen Datenbasis und den Planungsparametern an und weist jedem Teil eine Losgröße zu, ermittelt einen Standardcontainer (sofern erforderlich), und klassifiziert sie nach geeigneten Lagerungsmethoden (wie beispielsweise Bodenlagerung, Durchlaufregal, Teilesupermarkt, Fachbodenregal, Palettenregal, etc.). An dieser Stelle ist es erforderlich, das Planungstool an die speziellen Gegebenheiten des aktuellen Anwendungsfalls anzupassen. Aus diesem Grund wird bereits ab dem 3. Schritt eine zusätzliche grafische Planungsschiene integriert. Sie basiert auf dem Layout des zu planenden Bereiches und dient als Grundlage zur Strukturplanung und zur Visualisierung der Materialflüsse (Schritt 4).

Nur durch diese Kombination kann die vorgeschlagene Lagerungsweise des Planungstools an die technisch mögliche Lagertechnik angepasst werden und somit die erforderlichen Lagepositionen, Belegungsstrategien, Transportwege und Frequenzen (Punkt 5) berechnet werden. Wie eine solche Kombination aussehen kann ist in den Kapitel 5.1 und 5.2 gezeigt.

³⁶Diese Vorgehensweise wurde bereits in der Zeitschrift ProductivITy Management 12.2014 mit dem Fokus Production Management vorveröffentlicht [PETERS ET AL. 2014, S.38-40].

Die Werkstruktur ist in Form eines CAD Layouts in grau angegeben. Auf dieser sind die Materialflüsse in unterschiedlichen Farben angezeigt. Jeder Materialfluss, jeder Puffer und jede Operation ist durch eine Identifikationsnummer gekennzeichnet und damit mit dem PFEP-Planungstool verbunden. Dieses wird anschließend so konfiguriert, dass es die Transportfrequenzen, die erforderliche Transportausrüstung, Größen von Umpackbereichen und die Materialbereitstellung an den Linienstationen auf Basis der Kundennachfrage berechnen kann. So werden die einzelnen Linienstationen, deren Bereitstellungspuffer und das erforderliche Personal (Punkt 9) in die Planung einbezogen. Außerdem wird die erforderliche Verbindung zwischen Stammdaten (in der folgenden Darstellung orange markiert) und grafischer Planung geschaffen. Die beschriebene Vorgehensweise zur PFEP-Anwendung ist ein Werkzeug, das in der Regel ausschließlich während des Planungsprozesses verwendet wird. Es kann jedoch zu einem späteren Zeitpunkt wieder verwendet werden, um die Planung auf veränderte Situationen in Bezug auf das Produktionsvolumen, Supply-Chain-Bedingungen und Veränderungen der Teile anzupassen.

Der Wert des PFEP-Ansatzes besteht folglich nicht nur in der Erhebung, sondern vielmehr in der Nutzung dieser Informationen, die es ermöglichen fundierte Planungsentscheidungen zu treffen. Die Teileinformationen werden in die Berechnung vieler wichtiger Leistungsindikatoren einbezogen und genutzt, um die Materialplanung, -bewegung, -transformation und -lagerung zu verbessern. Es ist daher entscheidend, die PFEP-Datenbasis stetig zu aktualisieren, um die erwünschten Vorteile dauerhaft zu gewährleisten. Da ERP-Systemen die beschriebene grafische Komponente fehlt, ist es nicht möglich, alle Planungsschritte mit Hilfe eines ERP-Systems durchzuführen. Eine Vorgehensweise zur Materialfluss- und Werkstrukturplanung durch einen PFEP-Ansatz benötigt deshalb zwangsläufig ergänzende Softwareunterstützung.

Das erarbeitete Verfahren zur Losgrößenoptimierung wurde bereits bei Werksneuplanungen angewendet, bei denen ein PFEP Planungsansatz verwendet wurde. Im Folgenden werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse anonymisiert vorgestellt. Die Gliederung entspricht dem vorgestellten 10-Punkte-Plan, wobei auf die Losgrößenbildung (im Rahmen der Punkte vier bis acht) jeweils detailliert eingegangen wird.

5.1 Beispiel aus der Massenfertigung

Ein Motorenhersteller plant zu expandieren und ein neues Werk zu bauen. Dieses dient zu 80-85 % der Herstellung von Produkten für einen Kunden. Am neuen Standort sollen pro Jahr Kapazitäten zur Endmontage von etwa 50.000 Motoren vier unterschiedlicher Typen geschaffen werden. Alle Motoren werden dabei auf einer Montagelinie zusammgebaut, welche sämtliche Montageschritte angefangen vom Zylinderblock über den Zylinderkopf, den Turbolader, die Prüfung des fertigen Motors und das

abschließende Finishing umfasst. In diesem Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein real durchgeführtes Projekt, das anonymisiert vorgestellt wird.

Im Planungsprojekt werden die Produktionsbereiche, das Linienlayout, die Linienstationen, die erforderlichen Logistikfunktionen wie Lager, Umpackbereiche, Kommissionierung, Konfektionierung, Sequenzierung, das Fertigteilager und die erforderlichen innerbetrieblichen Transporte betrachtet. Die Aufgabenstellung betrifft somit die Planung aller innerbetrieblichen Prozesse, Materialflüsse und Losgrößen mit Hilfe eines PFEP- Ansatzes. Ein Schwerpunkt liegt auf der Abstimmung der Losgrößen entlang der gesamten Prozesskette innerhalb des Standorts. Diese legt den Grundstein für eine umfassendere Optimierung, denn in einem Folgeprojekt soll darüber hinaus eine Losgrößenabstimmung über die gesamte Lieferkette erfolgen.

Im betrachteten Werk sollen etwa 1.000 Artikelnummern geplant werden, wobei angenommen wird, dass sich diese Zahl in Zukunft – durch Vergrößerung des eigenen Wertschöpfungsanteils – erhöhen kann. Produziert wird vollkontinuierlich und im Vierschichtbetrieb. Weitere grundlegende Gegebenheiten sind, dass keine Kartonverpackungen an der Produktionslinie erlaubt sind, um Müll im Produktionsbereich zu vermeiden und dass Flurförderzeuge (wie Gabelstapler) auf ausgewiesene Bereiche beschränkt sein sollen. In der Produktionshalle sind darüber hinaus aus Sicherheitsgründen keine motorisierten FFZ mit Gabelzinken erlaubt. Ergonomische Aspekte, wie Gewichtsbeschränkungen für manuell bearbeitete Container, untere und obere Grenzen der Reichhöhe und Hilfsmittel zum leichteren Handling und ergonomischer Arbeitsplatzgestaltung müssen beachtet werden.

Diese unternehmensspezifischen Anforderungen scheinen der intuitiven Praxis gelegentlich zu widersprechen, für eine Abstimmung der Losgrößen jedoch sind sie sehr förderlich. Werden Materialien beispielsweise umgepackt und innerbetriebliche Transportbehälter verwendet, so kann sehr schnell und aktiv Einfluss auf die Losgröße genommen werden. Diese Möglichkeit ist bei einer unternehmensübergreifenden Abstimmung durchaus sinnvoll und möglich, erfordert jedoch wesentlich mehr Planungs- und Organisationsaufwand.

Der zweite Planungsschritt umfasst die Erstellung einer PFEP-Datenbasis. Für den skizzierten Anwendungsschritt umfasst die Datenbasis folgende Basisdaten (2.1):

- Artikelnummer
- Artikelbeschreibung
- Länge, Breite, Höhe, Durchmesser [mm]
- Gewicht [g]
- Schachtelfaktor [%]

(Der Schachtelfaktor beschreibt, wie gut die Teile ineinander passen. Er dient der Berechnung von Transport- und Lagerverpackungen. Plastikbecher können

beispielsweise zur Lagerung ineinander gesteckt werden. So benötigen 10 Plastikbecher ungefähr so viel Platz wie 2 einzelne. Ihr Schachtelfaktor beträgt demzufolge 80 %.)

- Material (Gusseisen, Metall, Leichtmetall, Kunststoff, Gummi, gemischt)
- Physikalischer Typ (fest, flexibel)
- IQC (Inbound Quality Check) erforderlich (Ja, Nein)
- Berührungsfreie Lagerung (Ist physischer Kontakt der Teile zueinander, bei Verpackung, Transport und Handhabung erlaubt? Präzisionsteile, Teile mit empfindlichen Oberflächen, schwere Teile, Teile, die leicht beschädigt werden können, etc. müssen berührungsfrei gelagert werden.)
- Abgeschlossene Lagerung (Ja, Nein)
- Sequenzierung
- Kitting Teil
- Andere Eigenschaften / Besonderheiten
- Teilefoto (Die Teilenummer und ein Lineal als Maßstab neben dem Teil in der Mitte des Fotos sind auf weißem Hintergrund abgebildet. Im Falle von komplexen Teilen werden 4 Fotos - eins von jeder Seite - gemacht. Um eine schnelle Speicherung und Übertragung der Fotos zu ermöglichen, wird eine niedrige Auflösung - ca. 1 Mpix - verwendet.)

Dadurch, dass es sich um eine schon bestehende Produktion in großen Stückzahlen handelt, sind diese Basisdaten bereits vorhanden und können aus dem ERP System extrahiert werden. Konsistenzchecks und geringere Anpassungen sind dennoch erforderlich. In den Schritten 2.2 und 2.3 werden diese Bestandsdaten um die folgenden Verpackungs- und Planungsdaten ergänzt:

- Handelt es sich um Mehrwegverpackung? (Ja/Nein)
- Kleinste Gebindeeinheit der Verpackung (Part Prepackaging Unit, kurz PPU)
(In einigen Fällen sind Teile im Inneren der Verpackung zusätzlich zu kleineren Gebinden zusammengefasst, beispielsweise in einem Plastikbeutel, in Folie oder in Papier eingewickelt abgepackt. In diesen Fällen werden die Art und Anzahl der Teile dieser Fertigpackungen erfasst. Diese Information kann wichtig für die Losgrößenermittlung, die Zuordnung von innerbetrieblichen Verpackungen und Vorrichtungen und für die Verpackungsabfallwirtschaft sein. Besitzt ein Teil keine PPU, bleiben die Felder leer.)
- Standard Verpackungseinheit (Single Packaging Unit, kurz SPU)
(Dabei handelt es sich um die kleinste Verpackung, die vom Lieferanten bezogen werden kann. Beispielsweise ein Karton, eine Holzkiste, Trommel, Rolle, oder eine Box, etc.)
- Länge, Breite und Höhe der Standard Verpackungseinheit
- Gewicht der Standard Verpackungseinheit

- Anzahl der Teile in einer Standard Verpackungseinheit
- Anzahl der PPU pro Standard Verpackungseinheit
- Anzahl zulässiger Stapelebenen der SU
- Lagerverpackung (Storage Unit)
(Euro-)Palette, Gitterbox, Coil, etc.
- Länge, Breite und Höhe der Lagerverpackung (SU)
- Leergewicht der SU
- Anzahl der primären Vendor-Verpackungen (SPU) in einer Sekundär-Vendor-Verpackung enthalten (SU)
- Anzahl der Teile in Secondary-Packaging-Verkauf (SU)
- Mindestbestellmenge (MOQ)
- Bestellinkrement (OQI)
(Das Bestellinkrement (OQI) wird aus dem jeweiligen System (z. B. ERP) kopiert. Die OQI zeigt die inkrementelle Anzahl der Teile, durch die die Bestellmenge weiter erhöht wird, sobald die MOQ erreicht ist. Beispiel: wenn $MOQ = 100$ und $OQI = 10$, kann eine tatsächliche Auftragsmenge 100, 110, 120 usw. sein. Typischerweise entspricht das OQI der Anzahl der Teile pro SPU oder SU.)
- Lieferant des Materials (Name und Ort)

Die so ermittelten und zusammengetragenen Informationen bilden den Hauptteil der erforderlichen PFEP-Datenbasis. Darauf basierend können erste Analysen und Abschätzungen sofort vorgenommen werden. Da es sich im Anwendungsfall bereits um eine stark standardisierte und lieferantenintegrierte Lieferkette handelt, sollen die Container (SPU) und Standardverpackungen als gegeben angesehen und zunächst nicht verändert werden. Auf diese Weise kann der Lagerbedarf für Groß- und Kleinteile anhand der aufgenommenen Datenbasis unmittelbar ermittelt und sofort für die nächsten Schritte der Layoutplanung (Schritt 3) und Visualisierung der Materialflüsse (Schritt 4) als Eingangsgrößen verwendet werden.

Anhand der Vorbereitungen aus der PFEP Datenbasis und mit Hilfe eines (CAD-) Layouts des neuen Standorts können so Anordnungsalternativen der unterschiedlichen Funktionsbereiche entwickelt werden. Die folgenden Darstellungen zeigen die letzten drei Alternativen, die in die engere Auswahl gezogen werden. Sie genügen den technischen und organisatorischen Anforderungen und die Lagerhaltung wird in Bezug auf die effiziente Nutzung von Speicherplatz und geeignete Technologien untersucht.

Die Bereichsanordnung und Dimensionierung kann nur in geringem Maße ohne den Einbezug von Materialflüssen erfolgen. Deshalb gehen die Planungsschritte 3 und 4 in der Regel Hand in Hand vorstatten. Ein weiterer Grund dafür ist, dass die ablauforganisatorischen Kriterien Effizienz, Effektivität und Prozessstabilität

Hauptbewertungspunkte für eine Layoutplanung und Evaluierung sind. Die Verbindung aus Layout- und Materialflussplanung schafft das unten gezeigte Materialflussmodell. Es stellt die innerbetrieblichen Prozesse farblich auf der erarbeiteten Layoutalternative dar und enthält die Funktionsbereiche Wareneingang, Umpackbereich, Lager, Kommissionierung, Produktion und Versand sowie die dafür erforderlichen Puffer- und Bereitstellungsflächen.

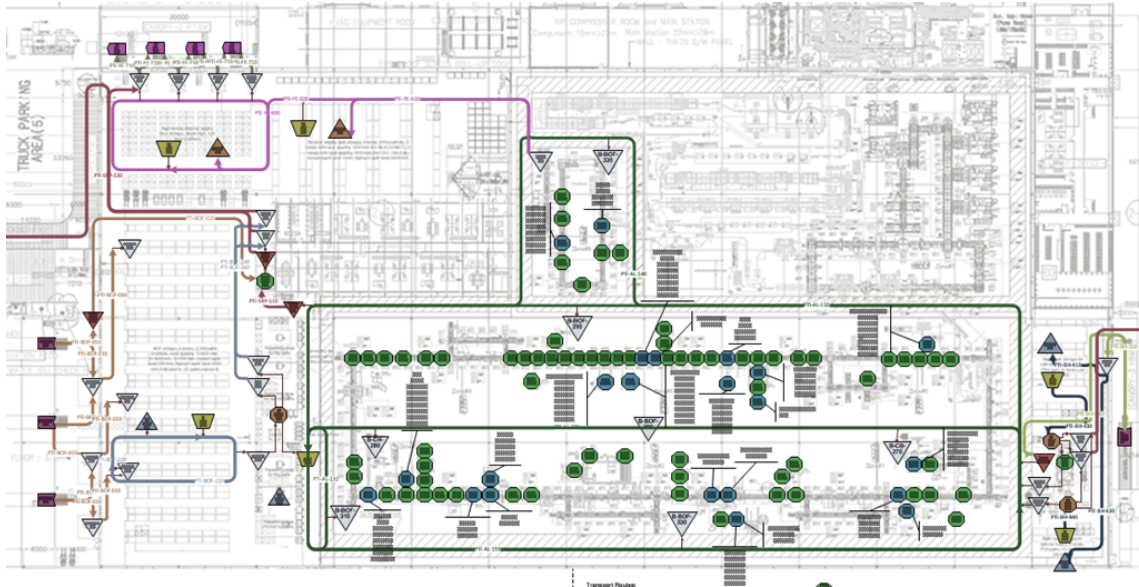


Abbildung 5-2: Verbindung aus Layout- und Materialflussplanung (Beispiel 1)

Aufgrund der Kombination aus Layout- und Materialflussplanung können die oben genannten Planungsprämissen eingehalten werden. Transportmittel werden den einzelnen Routen zugewiesen und auf physische Bereiche im Layout beschränkt. Die Versorgung der Produktion mit Nachschub erfolgt auf vorgeschriebenen Routen mit einem Schlepper und Transporttrolleys. Es werden ausschließlich Mehrwegverpackungsmittel an die Produktion übergeben, so dass an der Linie keine Umpack- und Vereinzlungsvorgänge vorgenommen werden müssen und theoretisch kein Müll entsteht.

In den Planungsschritten 5 und 6 werden die Produktions- und Versorgungsstrategien erarbeitet. Dazu werden die Nachfragemengen im PFEP-Planungsansatz über Stücklisten auf einzelne Leistungsobjekte umgerechnet. In diesem Beispiel handelt es sich um eine Massenproduktion, die als Produktionslinie mit Mehrmaschinenbedienung und U-Layout³⁷ bereits auf hohe Mengen ausgelegt wurde. Somit stehen weniger die physischen und technischen Prozesse an der Linie, sondern vielmehr Prozesslosgrößen, Anlieferungsmengen und Materialbereitstellungsstrategien im Vordergrund. Dazu zählen hauptsächlich:

³⁷ Eine U-förmig aufgebaute Montagelinie, bei der die Arbeitsinhalte auf unterschiedlich viele Mitarbeiter aufgeteilt werden können[BULLINGER 2009, S.580 f.].

1. Ist-Prozesse aufnehmen
2. Soll-Prozesse erarbeiten
3. Losgrößen berechnen
4. Reichweiten berechnen
5. Versorgungsstrategien und Trigger ermitteln
6. Puffer- und Bereitstellungsflächen planen

Die Materialflussdarstellung bietet außerdem den Vorteil, dass sie als Grundlage für die Losgrößenplanung verwendet werden kann. Prozesse und deren Ressourcen werden leicht ersichtlich. Damit entsteht eine to-do Liste für die Losgrößenberechnung. An dieser Stelle wird die Losgrößenermittlung für die Hauptprozesse Umpacken, Kommissionierung, Linienversorgung und Produktion vertieft. Diese ausgewählten Prozesse sind hier vereinfacht mit der in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Methodik dargestellt.³⁸

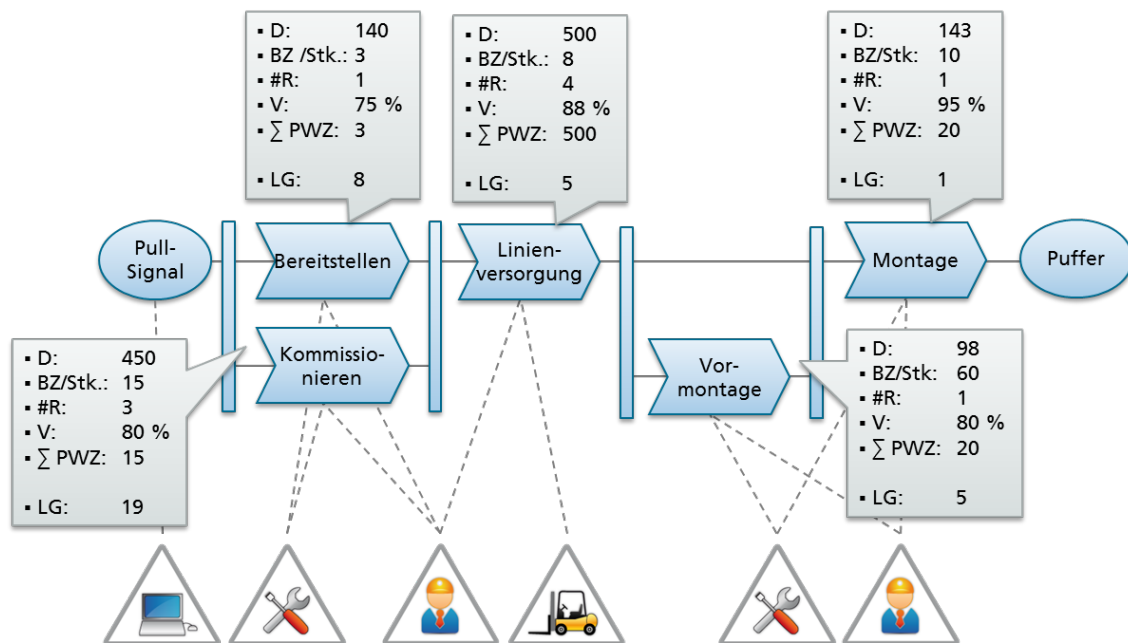


Abbildung 5-3: Vereinfachte Teilprozesskette (Beispiel 1)

Abbildung 5-3 zeigt die Prozesskette und die beteiligten Ressourcen für das Beispielunternehmen. Bei dieser Darstellung wurden detaillierte Handlings- und Buchungsprozesse zugunsten der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt. Die in den Datenkästen angegebenen Ressourcen beschreiben jeweils die Anzahl aller erforderlichen Ressourcen zur Durchführung eines Prozesses. Für die Berechnungsschritte und Parameter der einzelnen Prozesse wurde auf in diesem Beispiel aus Übersichtlichkeitsgründen auf Sprechblasen zurückgegriffen. Ähnlich der Wertstromdarstellung aus Kapitel 4.1.1 wären aber auch Datenkästen oder andere

³⁸Die vollständige Prozesskette inklusive der Berechnungen ist dem Anhang beigelegt.

Darstellungsformen denkbar. Im Anhang sind die Parameter direkt unter den Prozessen dargestellt.

Zur Losgrößenberechnung wurde der Nivellierungsfaktor aus Kapitel 4.4.1 verwendet:

$$LG_{Prozess} = NF * d = \frac{\sum_{i=1}^n BZ}{(\#Ress * V * AZ) - \sum_{i=1}^n PWZ} * d$$

Die prozessspezifischen Variablen sind in Abbildung 5-4 angegeben:

Prozess	d [Stk.]	# Prod	BZ [Min/Prod]	#R	V [%]	AZ [h]	PWZ [Min]	LG _{Prozess}
Bereitstellen	140	600	3	1	75	8	3	8
Kommissionieren	450	600	15	3	80	15	3	19
Linienversorgung	500	600	8	4	88	24	7	5
Vor montage	98	40	60	1	60	15	20	5
Montage	143	4	10	1	95	24	15	1

Abbildung 5-4: Parameter zur Losgrößenberechnung (Beispiel 1)

Die Losgrößen wurden anhand des Nivellierungsfaktors über die Prozesskette angeglichen und für jeden Prozess einzeln berechnet. Die Linienversorgung wurde gemäß der Definition (siehe Kapitel 4.4.1) auf die maximale Geschwindigkeit im Kundenprozess ausgelegt. Für den realen Einsatz im Unternehmen wurden die Losgrößen nach der Berechnung auf Prozessebene an die technischen Gegebenheiten angepasst und über die Prozesskette geglättet. Das bedeutet, dass Entkopplungspunkte festgelegt und die Werte auf vielfache der technischen Losgrößen gerundet wurden. Beispielsweise bedient sich der Kommissionierprozess zu großen Teilen der Leistungsobjekte *Container*, die Linienversorgung hingegen *Trolleys*. Folglich wurden die Trolleys so ausgelegt, dass sie 20 Container aufnehmen und transportieren können. Damit wird ein reibungsloser und standardisierter Ablauf gewährleistet und ein Logistikprozess genutzt um andere Prozesse aufeinander abzustimmen.³⁹

Um der Planungsprämisse der steigenden Artikelnummern durch eine Erhöhung der Fertigungstiefe gerecht zu werden, werden so genannte *Dummy-Teile* (Platzhalter) in die PFEP Datenbasis einbezogen. Deren Bedarfe werden zunächst als Null angenommen, so dass für sie keine Berechnungen durchgeführt werden. Sobald die erforderlichen Bedarfsmengen und die Stammdaten in die Planungsdatenbasis eingegeben wurden, werden die neuen Teile in die gesamte Planung einbezogen.

³⁹Die Ausweitung der Losgrößenberechnung auf die gesamte überbetriebliche Prozesskette ist derzeit noch nicht abgeschlossen, deshalb können dazu noch keine Daten angegeben werden.

Anschließend können die Losgrößen mit den Prozessen zusammen sichtbar gemacht werden. Dazu werden das PFEP Planungstool und die Materialflussdarstellung in Einklang gebracht. Das bedeutet, dass jeder Prozess und jeder Materialfluss anhand seiner Nummer in das PFEP Planungstool eingefügt wird. Damit werden dem Prozess die entsprechenden Attribute, wie Losgröße, Wegstrecke, Reichweite, etc. zugewiesen. So kann die Materialflussgestaltung (Schritt 7) durchgeführt werden. Hier werden Transportprozesse abgestimmt, Transporthäufigkeiten festgelegt und nach Möglichkeit Versorgungsrouten zusammengelegt. Tätigkeiten können unterteilt oder zusammengefasst und für die Personalplanung in Schritt 9 verwendet werden. Auf die Implementierung und das Training (Schritt 10) wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, weil sie für die Anwendung des Losgrößenverfahrens nicht entscheidend sind.

5.2 Anwendung in einer Serienproduktion

Dieser Anwendungsfall thematisiert den Umzug einer Produktion von einem Gebäude in ein anderes. Analog zum ersten Anwendungsbeispiel soll eine Abstimmung der Losgrößen über die gesamten innerbetrieblichen Prozesse erfolgen. Es handelt sich, wie in Kapitel 5.1 auch, um ein tatsächlich durchgeführtes Projekt, das anonymisiert vorgestellt wird.

Das betreffende Unternehmen gehört zur Automobilzulieferbranche und plant den Umzug einer Produktionssparte in eine neue Halle auf dem gleichen Werksgelände. Verlagert werden vier Produktionslinien, die vorwiegend in großen bis mittelgroßen Serien unterschiedliche Produkttypen einer Rauchgasreinigungsanlage für LKW aller Hersteller produzieren. Nach dem Umzug sollen Kapazitäten zur jährlichen Produktion von circa 75.000 Produkten verteilt auf 24 unterschiedliche Typen geschaffen werden. Im Planungsprojekt geht es nicht nur um die Produktionsbereiche und das Linienlayout, sondern auch um die erforderlichen Logistikfunktionen wie Lager, Umpackbereiche, Kommissionierung, Konfektionierung, Sequenzierung, das Fertigteilelager und die zugehörigen innerbetrieblichen Transporte. Der Umzug soll zum Anlass genommen werden, eine Restrukturierung der historisch gewachsenen innerbetrieblichen Materialflüsse durchzuführen. Für die Aufgabenstellung wird, analog zum ersten Anwendungsbeispiel, ebenfalls ein PFEP-Planungsansatz verwendet. Ein Fokus liegt auch hier auf der Abstimmung der Losgrößen entlang der gesamten Prozesskette des Standorts.

In diesem Anwendungsbeispiel wird für circa 600 Artikelnummern geplant. Die Produktion erfolgt in zweischichtiger Arbeitsweise an fünf Tagen pro Woche, bei der in Ausnahmefällen auch samstags produziert werden kann, um akute Nachfrageschwankungen abzudecken. Ähnlich wie im ersten Beispiel (Kapitel 5.1) wünscht das Unternehmen keine Plastik-Einweg- und Kartonverpackungen an der

Produktionslinie, um Abfall im Produktionsbereich zu vermeiden. In der Produktionshalle sind darüber hinaus aus Sicherheitsgründen keine motorisierten Flurförderfahrzeuge mit Gabelzinken erlaubt. Ergonomische Aspekte, wie Gewichtsbeschränkungen für manuell zu bewegende Container sowie Mindest- und Maximalgrenzen der Greifhöhen, zum leichteren Handling sollen bei der Umplanung ebenfalls berücksichtigt werden. Ein weiteres Ziel ist damit die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Nach der Erhebung von Planungsparametern und Basisdaten, ist die Erstellung einer PFEP-Datenbasis der nächste Planungsschritt. Da es sich um eine ähnliche Vorgehensweise wie im ersten Beispiel handelt und die Vorgehensweise in Kapitel 5.1 ausführlich beschrieben wurde, wird nicht weiter auf die gesamte Datenbasis, sondern ausschließlich auf wesentliche Abweichungen vom ersten Beispiel eingegangen.

Im Gegensatz zum ersten Beispiel handelt es sich bei diesem Anwendungsfall um eine Versorgungskette mit geringer Lieferantenintegration. Deshalb werden viele Rohmaterialien in Einwegverpackungen angeliefert und müssen in Zukunft umgepackt werden, bevor sie zur Produktion bereitgestellt werden dürfen. Das bedeutet, dass nicht nur die Teile vermessen und deren spezifische Daten einzeln dokumentiert werden müssen, sondern auch, dass in den Schritten 2.2 und 2.3 Verpackungs- und Planungsdaten erhoben werden müssen. Eine wesentliche Erleichterung ist es, die Daten von Gebinde- und Verpackungsmengen inklusive deren Abmessungen von den Lieferanten einzuholen. Dies kann ein erster Schritt zur Lieferantenintegration sein und die PFEP-Datenbasis im Anschluss an das Planungsprojekt zur weiteren Abstimmung der Liefermengen und Losgrößen mit den Lieferanten verwendet werden. Für den Projektverlauf bedeutet dies jedoch auch, dass die Lieferantenverpackungen im Gegensatz zum ersten Beispiel nicht an die Produktionslinie gebracht werden können und folglich alle Rohmaterialien in innerbetriebliche Mehrwegverpackungen umgepackt werden müssen. Grundlage dafür bietet die in Schritt 5 ermittelte Losgröße, die auf Teileebene umgerechnet werden kann. Mit ihr kann der Lagerbedarf für Groß- und Kleinteile anhand der angenommenen Verpackungsmittel erfasst werden. Dies wird erst zu einem späteren Zeitpunkt kurz erläutert, weil es für das Anwendungsbeispiel nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Lagerbereiche sollen im Rahmen der Umzugsplanung zunächst beibehalten und ggf. erst bei steigenden Absatzmengen vergrößert werden.

Anhand der Vorbereitungen aus der PFEP-Analyse und mit Hilfe eines (CAD-) Layouts können so auch in diesem Fall Anordnungsalternativen der Produktionslinien entwickelt werden. In der kombinierten Materialfluss- und Layout-Planung ist die Flächenanordnung mit der logistischen Anbindung der neuen Halle dargestellt und darauf sind, wie im Anwendungsbeispiel zuvor, die Materialflüsse angegeben. Sie genügen den technischen und organisatorischen Anforderungen und das Lager wird in Bezug auf die effiziente Bereitstellung der Materialien für alle beteiligten Bereiche

untersucht. Die Linienanordnung und Dimensionierung der Bereitstellungsflächen kann nur in geringem Maße ohne den Einbezug von Materialflüssen erfolgen. Deshalb gehen die Planungsschritte 3 und 4 auch hier wieder einher. Ebenso sind die ablauforganisatorischen Kriterien Effizienz, Effektivität und Prozessstabilität (wie im vorangegangenen Beispiel beschrieben) Hauptbewertungspunkte für eine Layoutplanung und Evaluierung. Die Verbindung aus Layout- und Materialflussplanung erfolgt in einem Materialflussmodell, das in Abbildung 5-5 gezeigt wird. Es stellt die innerbetrieblichen Prozesse farblich auf der erarbeiteten Layoutalternative dar und enthält die Funktionsbereiche Wareneingang, Umpackbereich, Lager, Kommissionierung, Produktion und Versand sowie die jeweils erforderlichen Puffer- und Bereitstellungsflächen. So werden Wegstrecken, Richtungen und Kollisionspunkte erkennbar. Auch Übergabepuffer und Flächen werden erkennbar und können dimensioniert werden.

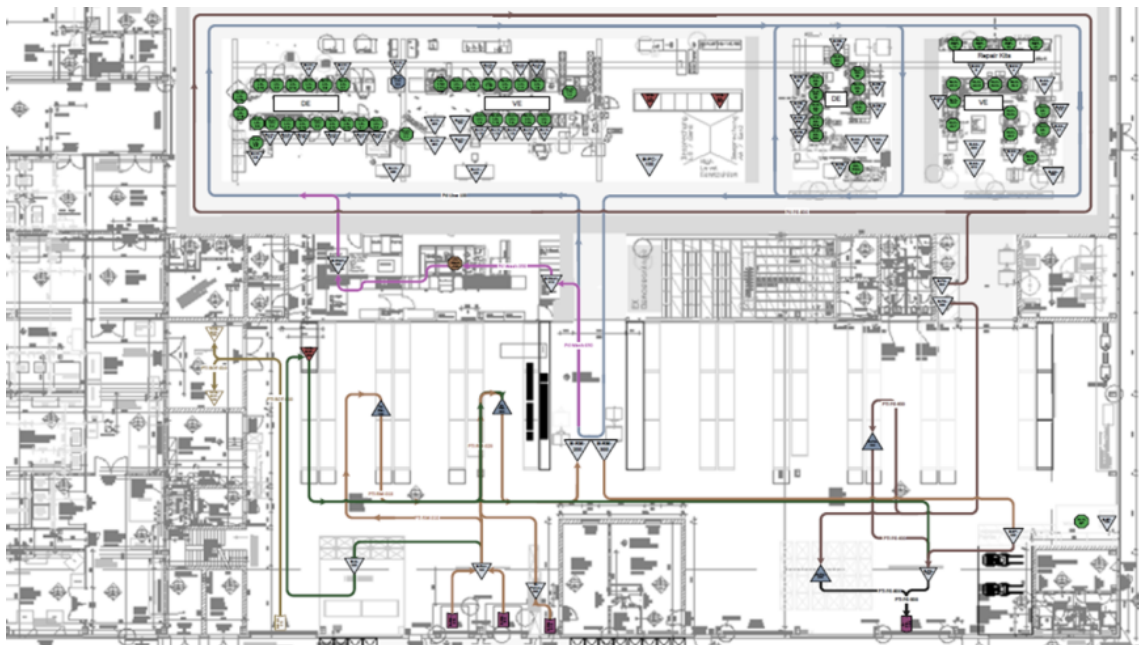


Abbildung 5-5: Kombination aus Layout- und Materialflussplanung (Beispiel 2)

Durch diese Kombination aus Layout- und Materialflussplanung können die eingangs beschriebenen Planungsprämissen eingehalten werden. Transportmittel werden den einzelnen Routen zugewiesen und auf physische Bereiche im Layout beschränkt. Die Versorgung der Produktion mit Nachschub erfolgt auf vorgeschriebenen Routen mit einem Schlepper und Transporttrolleys. Es werden ausschließlich Mehrwegverpackungsmittel an die Produktion übergeben, so dass an der Linie keine Umpack- und Vereinzlungsvorgänge vorgenommen werden müssen und (theoretisch) kein Müll entsteht.

In Planungsschritt 5 werden passgenaue Produktions- und Versorgungsstrategien erarbeitet. Im gewählten Beispiel handelt es sich um eine Serienfertigung, mit vier

Produktionslinien, die als U-Layout geplant sind und bei denen eine Mehrmaschinenbedienung möglich ist. Die Nachfragemengen wurden über Stücklisten im PFEP-Planungsansatz auf einzelne Leistungsobjekte umgerechnet. Wie im ersten Beispiel stehen weniger die physischen und technischen Prozesse an der Linie, sondern vielmehr Prozesslosgrößen, Liefermengen und Materialbereitstellungsstrategien im Vordergrund. Dazu zählen hauptsächlich:

1. Ist-Prozesse aufnehmen
2. Soll-Prozesse erarbeiten
3. Losgrößen berechnen
4. Reichweiten berechnen
5. Versorgungsstrategien und Trigger ermitteln
6. Puffer- und Bereitstellungsflächen planen

Die kombinierte Materialfluss und Layoutdarstellung dient ebenfalls als Grundlage für die Losgrößenplanung, die Prozesse und deren Ressourcen abbildet. Analog zum ersten Beispiel, lässt sich daraus eine to-do Liste für die Losgrößenberechnung ableiten. An dieser Stelle werden die Losgrößenermittlungen für die Hauptprozesse Kommissionierung, Umpacken, Bereitstellen, Linienversorgung und Produktion betrachtet.⁴⁰

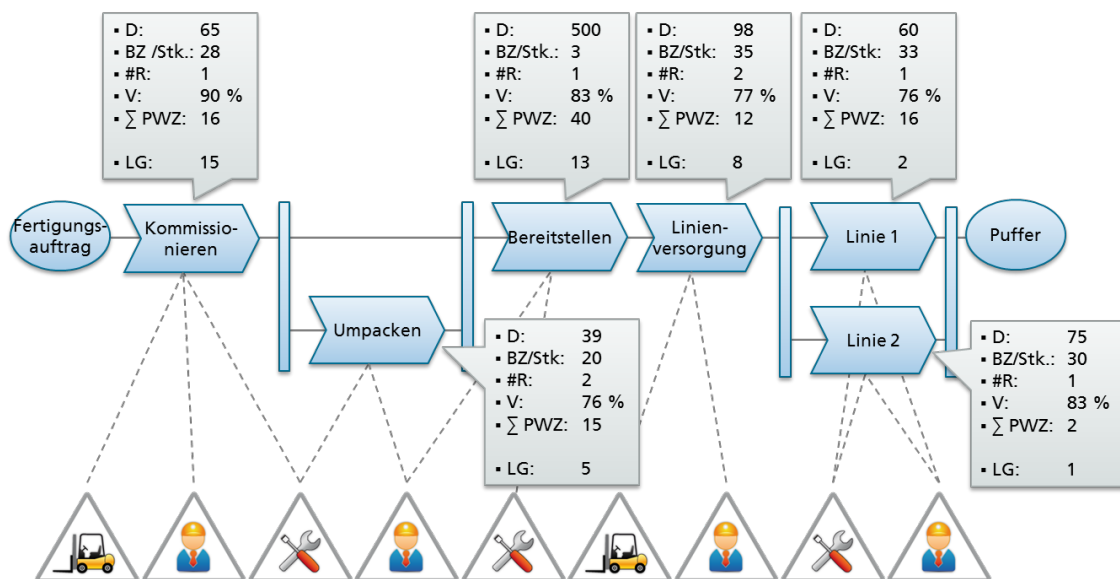


Abbildung 5-6: Vereinfachte Teilprozesskette (Beispiel 2)

Abbildung 5-6 zeigt die Prozesskette sowie die beteiligten Ressourcen für das Beispielunternehmen. Analog zum ersten Beispiel wurden bei der Darstellung detaillierte Handlings- und Buchungsprozesse zugunsten der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. Die in den Datenkästen angegebenen Ressourcen beziehen sich jeweils auf

⁴⁰Eine Tabelle mit allen ermittelten Losgrößen und der gesamten Prozesskette ist dem Anhang beigefügt.

die Anzahl aller erforderlichen Ressourcen zur Durchführung eines Prozesses. Die Losgrößenermittlung erfolgt gleichermaßen mit der in Kapitel 4.4 erarbeiteten Methode und der Formel:

$$LG_{Prozess} = NF * d = \frac{\sum_{i=1}^n BZ}{(\#Ress * V * AZ) - \sum_{i=1}^n PWZ} * d$$

Die zur Berechnung erforderlichen, prozessspezifischen Variablen sind in Abbildung 5-7 angegeben:

Prozess	d [Stk.]	# Prod	BZ [Min/Prod]	#R	V [%]	AZ [h]	PWZ [Min]	LG _{Prozess}
Kommisionieren	65	300	28	1	90	7	16	15
Umpacken	39	400	20	2	76	7	15	5
Bereitstellen	500	300	3	1	83	7	40	13
Linienversorgung	98	300	35	2	77	14	12	8
Linie 1	60	18	33	1	76	7	16	2
Linie 2	75	6	30	1	83	14	2	1

Abbildung 5-7: Parameter zur Losgrößenberechnung (Beispiel 2)

Da es sich in diesem Anwendungsfall um eine nicht standardisierte und nicht lieferantenintegrierte Lieferkette handelt, müssen die Container (SPU) und Standardverpackungen definiert und für jedes Teil in der Datenbasis berechnet werden. Die ermittelten Losgrößen dienen dazu direkt als Anhaltspunkte. Für die Linienversorgung wurde gemäß der Definition (aus Kapitel 4.4.1) die maximale Geschwindigkeit im Kundenprozess angenommen.

Der adäquate Containertyp lässt sich mit einem Algorithmus ermitteln, der die Teilegeometrie und -verbrauch ausgehend von sechs Standardcontainern berechnet. Er berücksichtigt die physikalische Teilegeometrie, Verbrauchsdaten sowie ergonomische Anforderungen und berechnet damit die geschätzte Anzahl der Teile, die in einen Behälter passen, das Bruttogewicht des Behälters, die Reichweite und die maximale Anzahl der Behälter pro Palette sofern die Behälter palettiert werden können. Bei den Kennzahlen handelt es sich um theoretisch ermittelte Größen, die mithilfe von Verpackungsversuchen in der täglichen Praxis validiert werden müssen. Durch den Datenabgleich der Containerzuordnung mit denen der Losgrößenplanung können die Verpackungseinheiten auf die Verbrauchsmengen ausgerichtet werden. Zusätzlich werden, die Losgrößen analog zum ersten Beispiel über die Prozesskette abgeglichen

und abgestimmt. Bei der Serienproduktion stellt sich zusätzlich die Frage, ob alle Prozesse ausschlaggebend sind und folglich für alle Losgrößen geplant werden sollten.

Um der Planungsprämisse der steigenden Artikelnummern mit neuen Produkten gerecht zu werden, werden auch in diesem Beispiel Dummy-Teile als Platzhalter in die PFEP-Datenbasis integriert. Deren Bedarfe werden zunächst als Null angenommen, so dass sie nicht in die Berechnungen einbezogen werden. Sobald die erforderlichen Bedarfsmengen und die Stammdaten in die Planungsdatenbasis eingegeben wurden, werden die neuen Teile – wie jedes andere Teil auch – in die gesamte Planung einbezogen.

Abbildung 5-6 zeigt die Visualisierung der Losgrößen zusammen mit den Prozessen. Abschließend werden das PFEP-Planungstool und die Materialflussdarstellung in Einklang gebracht. Das bedeutet, dass jeder Prozess und jeder Materialfluss anhand seiner Nummer in das PFEP-Planungstool eingefügt wird. Damit werden dem Prozess die entsprechenden Attribute, wie Losgröße, Wegstrecke, Reichweite, etc. zugewiesen. Damit kann die Materialflussgestaltung (Schritt 7) durchgeführt werden. Dabei werden Transportprozesse abgestimmt, Transporthäufigkeiten festgelegt und nach Möglichkeit Versorgungsrouten zusammengelegt. Tätigkeiten können unterteilt oder zusammengefasst und somit für die Personalplanung in Schritt 9 verwendet werden. Auf die Implementierung und das Training (Schritt 10) wird analog zum ersten Beispiel, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, weil diese für die Anwendung der Losgrößenoptimierung nicht entscheidend sind.

Fazit

Die Losgrößenberechnung dieser Arbeit bezieht sich auf Leistungsobjekte in den Prozessschritten. Dies verursacht einen hohen Detaillierungsgrad der Datenaufnahme. Insbesondere der Transport, aber auch weitere Logistikprozesse können jedoch sehr flexibel auf unterschiedliche Leistungsobjekte ausgelegt werden und dazu genutzt werden, Losgrößen prozessübergreifend Prozessen zu abzustimmen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ermittlung einer *optimalen* Losgröße ist eine der ältesten betriebswirtschaftlichen Problemstellungen. Diese wurde hier aufgegriffen und im Kontext von *Industrie 4.0* und prozessorientierter Unternehmensstrukturen erneut bearbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass sich Optimierungsbestrebungen und deren Zielgrößen über die Jahre verändert haben. Ausgehend von klassischen Verfahren, die Kosten für Auftragswechsel und Lagerung in einem einstufigen Modell gegenüberstellen, wurden zuletzt immer mehr Kriterien in Losgrößenentscheidungen einbezogen.

Um die Realität genauer abzubilden, wurden Losgrößenverfahren in den letzten Jahren stetig komplexer ausgelegt. Dazu wurden neue Optimierungsverfahren und Produktionssysteme entwickelt, die einzelnen Anforderungen Rechnung tragen. Die umfassende Betrachtung einer Losgrößenoptimierung auf Prozessebene blieb dabei jedoch aus. Es bleibt festzuhalten, dass die zunehmende Komplexität der Losgrößenverfahren, zu der von *Industrie 4.0* angestoßenen Schlussfolgerung führt, dass komplexere Systeme dezentral gesteuert werden müssen, um sie trotz ihrer Komplexität beherrschbar zu halten. Generell haben sich die Anforderungen durch kundenindividuelle Märkte gewandelt, so dass Flexibilität eine wesentlich größere Rolle in der strategischen Unternehmensführung spielt. Dies hat Auswirkungen auf die Anforderungen an Losgrößenentscheidungen.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Ermittlung von Losgrößen auf Prozessebene entwickelt. Dazu wurden die drei Hauptbestandteile der Losgrößenermittlung *Modellierung*, *Flexibilität* und *Kosten* erarbeitet und evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass Losgrößenentscheidungen nicht länger reine Kostenoptimierungen sind. Flexibilität hat als Optimierungskriterium einen großen Stellenwert erreicht. Es wurden Vorgehensweisen zur Kostenminimierung und Flexibilitätserhöhung vorgestellt, analysiert und darauf aufbauend ein neues Verfahren zur Losgrößenoptimierung erarbeitet. Dieses integriert Kosten- und Flexibilitätskriterien sowie prozessübergreifende Betrachtungen und Kundenwünsche. Durch die Verwendung der Kundennachfrage und des Kundentaktes bei der Losgrößenberechnung kann die tatsächliche Kundennachfrage in Losgrößenentscheidungen einbezogen werden. Die Losgrößenentscheidung wird damit auf die Kundennachfrage ausgerichtet und Verschwendung in Form von Überproduktion vermieden. Weitet man diese Vorgehensweise aus, so ergeben sich daraus zusätzlich Nivellierungseffekte, die Losgrößen über Prozesse hinweg angleichen. Damit wird vor Allem den zeitlichen Zielgrößen der Logistik Rechnung getragen.

Hinsichtlich der erarbeiteten Anforderungen an eine prozessorientierte Losgrößenermittlung konnte gezeigt werden, dass die Prozesskostenrechnung für die

rechnerische Losgrößenoptimierung keine neuen Anhaltspunkte liefert. Dies liegt daran, dass die Losgröße als Eingangsgröße verwendet wird. Darüber hinaus konnte am Beispiel der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung dargelegt werden, dass der Grundsatz: Je größer die Losgröße, desto kostengünstiger der Prozess, weiterhin Bestand hat. Aus diesem Grund wurde die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung nicht direkt in die Losgrößenoptimierung einbezogen. Darüber hinaus wurde erarbeitet, dass bezogen auf die Prozesskette Überproduktion, Bestand und Warten die größten Verschwendungsarten darstellen. Diese Erkenntnisse konnten in die Abstimmungsmechanismen zur Losgrößenoptimierung einbezogen und durch eine ganzheitliche, an der Wertschöpfungskette ausgerichtete Modellierung in die Betrachtungen einbezogen werden.

Durch die von *Industrie 4.0* geschaffenen Rahmenbedingungen ist es notwendig, einzelne Prozesse in Bezug auf ihre Losgrößenentscheidung mit Autonomie auszustatten. Wird das entwickelte Losgrößenverfahren als zeitlich diskret aufgefasst, kann aus Sicht einzelner Prozesse jeweils eigenständig auf Basis sich verändernder Umstände eine Losgrößenentscheidung getroffen werden. Sie kann folglich auf den einzelnen Prozess bezogen autonom ermittelt, oder in den Bezugsrahmen der Prozesskette eingebettet werden. Die umfassende prozesskettenübergreifende Modellierung mit dem Dortmunder Prozessketteninstrumentarium leitet dazu an, einzelne Losgrößen als Vorschlag, beziehungsweise Richtwert für die Losgröße zu interpretieren und das Gesamtoptimum im Rahmen der gesamten Prozesskette zu finden. Auf diese Weise sind weitere, prozesskettenbezogene Parameter zur Losgrößenoptimierung denkbar. Es ist beispielsweise in einer vernetzten, unternehmensübergreifenden Prozesskette möglich, dezentral, auf Prozessebene, autonom anhand von Parametern, wie beispielsweise der Auftragspriorisierung, des Wartungsintervalls, anhand von Schichtsystemen, oder anderer Kriterien Losgrößen festzulegen. Eine Losgröße, wie sie auf Basis der in dieser Arbeit ermittelten Vorgehensweise berechnet wird, kann dabei wichtige Hinweise auf die Kriterien integrative Modellierung, Kosten und Flexibilität liefern.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren liefert die theoretischen Hintergründe und die praktische Vorgehensweise zur Ermittlung der Losgröße auf Prozessebene. Darüber hinaus wurden in Kapitel 5 zwei Anwendungsbeispiele skizziert. Durch die Anwendung der Losgröße auf Prozessebene konnten signifikante Verbesserungen erzielt werden. Die Flexibilität der Einzelprozesse wurde sowohl in Bezug auf die Menge als auch die zeitliche Auftragsabwicklung deutlich verbessert. Daraus resultierte eine Flexibilitätssteigerung der gesamten Prozesskette. Auch die Produktion im Kundentakt ist als wesentliche qualitative Verbesserung anzusehen, da sie die Prozesskette harmonisiert und ihren Output auf den Kunden ausrichtet. Diese Beispielunternehmen konnten im gesamten Auftragsdurchlauf sowohl die Verpackungsmittel, als auch die

Transportlosgrößen in signifikantem Umfang verbessern. Dies ist eine wichtige Errungenschaft der Losgrößenoptimierung, weil (wie in Kapitel 5 gezeigt) die Abläufe besser aufeinander abgestimmt werden und damit effizienter durchgeführt werden können. Stützprozesse, wie das Umpacken oder Zwischenlagern entfallen und Ressourcen werden frei. Teile der Potenziale könnten durch eine konsequente Anwendung des Lean Managements erschlossen werden. Der für diese Arbeit relevante Steuerungsaspekt erfolgt allerdings erst durch die Losgrößenoptimierung auf Prozessebene. Die in den Beispielen betrachteten Lieferketten sind maßgeblich durch die Beispielunternehmen dominiert und determiniert. Um eine solche Optimierung, wie sie hier vorgeschlagen wird, innerhalb einer Supply Chain durchzuführen, fehlen oftmals die Kommunikations- und Informationsstrukturen der Akteure untereinander. Auch geeignete Anreizsysteme über Unternehmensgrenzen hinweg müssen erst noch geschaffen werden.

Weiterhin ist die Integration der Losgrößenoptimierung auf Prozessebene in ein Softwaresystem für eine praktische Implementierung und zur leichteren Verwendung wünschenswert. Auf diese Weise könnte die Modellierung vereinheitlicht und die Zielgruppe vergrößert werden. Dies gilt zum Beispiel für die Anwendung des Losgrößenverfahrens in anderen Standorttypen und bei bereits bestehenden Produktionsstätten. Darüber hinaus würden Vergleiche mit anderen Losgrößenverfahren bei gleichen Prozessen und Problemstellungen ermöglicht. In diesem Rahmen wäre auch der Vergleich mit multi echelon Modellen sinnvoll, da die Losgrößenoptimierung auf Prozessebene selbstverständlich auch Bestandspolitiken in Netzwerken beeinflusst. Eine Simulation der Losgrößenoptimierung auf Prozessebene könnte zusätzlich dazu beitragen, seine Zielgruppe zu vergrößern, weitere Nutzenpotenziale zu erkennen und das Verfahren in Bezug auf andere Anwendungsbereiche zu validieren.

Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass das in dieser Arbeit entwickelte Losgrößenverfahren für die Anwendung bei repetitiven Tätigkeiten der Serienproduktion ermittelt wurde. Inwiefern es auch für Einzel- und Kleinserienfertigung sowie andere Anwendungsbereiche wie etwa die Prozessindustrie geeignet ist, oder auf welche Weise es zur Losgrößenoptimierung hier modifiziert werden müsste, wäre ein interessanter Ansatz für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet.

7 Literaturverzeichnis

- ALTROGGE, G. (1979): Flexibilität in der Produktion, in Kern, W.; Schröder, H.-H.; Weber, J.(Hg.) *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, Stuttgart, Schäffer-Poeschel, S.604-618.
- ANDLER, K. (1929): *Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße*, München, Oldenbourg.
- ARROW, K. J. & KARLIN, S. (1958): Production over time with increasing marginal costs, in: K.J. ARROW, S. KARLIN, H. SCARF (Eds.) *Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production*, Stanford University Press, Standford, 61-69.
- BAI, S. X., VARANASI, S.(1996): An optimal production flow control problem with piecewise constant demand, *Mathematical Computer Modelling* Vol. 24, No. 7, S. 87 – 107.
- BAUERNHANSL, T. ET AL. (2014): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Anwendung – Technologien – Migration*, Berlin, Springer.
- BECKER, H. (2006): *Phänomen Toyota, Erfolgsfaktor Ethik*, Berlin, Springer.
- BECKER, J. & KAHN, D. (2005): Der Prozess im Fokus. In: Becker, Jörg; Kugeler, Martin; Rosemann, Michael (Hrsg.): *Prozessmanagement – Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. 5. überarb. und erw. Aufl., Berlin: Springer, 2005, S.3-16.
- BECKER, J. (Hg.) ET AL. (2008): *Prozessmanagement. Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*, 6., überarb. u. erw. Aufl., Heidelberg, Springer.
- BECKER, T. (2005): *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*, Berlin, Springer.
- BECKMANN, H. (1994): Holographie - Ein Leitbild der Unternehmensgestaltung im Spannungsfeld zwischen Ordnung und Chaos, in: H.-P. Wiendahl; V. Ahrens (Hg.): *Potentiale der Chaosforschung in der Produktionswissenschaft, Tagungsband zum Workshop am 28.02 und 01.03.1994 in Hannover*, Dortmund, Verlag Praxiswissen, S.45-69.
- BECKMANN, H. (2010): Diagnose der Positionierungsgüte des Kundenauftragsentkopplungspunktes auf Basis des Prozesskettenparadigmas, in Clausen, U.; Ten Hompel, M.(Hg.) *Facetten des Prozesskettenparadigmas*, Reihe: Fabrikorganisation Band 4: Wege zur innovativen Fabrik, Dortmund, Praxiswissen, S.172-203.
- BECKMANN, H. (2012): *Prozessorientiertes Supply Chain Engineering*, Wiesbaden, Gabler.
- BECKMANN, H. ET AL. (2014): Produktionskennlinien im Prozesskettenparadigma, in *Industrie Management* 30 1/2014 Februar, S.22-26.
- BEHRBOHM, P. (1985): *Flexibilität in der industriellen Produktion*, Dissertation, Frankfurt am Main.

- BENGER, A. (2007): *Gestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken*, (Reihe Wirtschaftsinformatik: Technische und organisatorische Gestaltungsoptionen, Gronau, Norbert (Hg.) Berlin, Gito.
- BINNER, H. F. (2005): *Handbuch der Prozessorientierten Arbeitsorganisation. Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung* (REFA Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung) München, Carl Hanser Verlag.
- BMBF (2014): *Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, in Forschung BMBF, <http://www.bmbf.de/de/9072.php> Abgerufen am 18.08.2014.
- BMW (2014): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0* <http://www.bmw.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zukunft-der-arbeit-in-industrie-4-0,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> Abgerufen am 18.08.2014.
- BOMBERGER, E. E. (1966), A Dynamic Programming Approach to a Lot Size Scheduling Problem, in: *Management Science*, Vol. 12, No. 11, 1966, S. 778-784.
- BONVIK, A. M. ET AL. (1997): “A comparison of production- line Control mechanisms”, in: *International Journal of Production Research*, 35, 1997, 3, S. 789-804.
- BULLINGER, H.-J. & TEN HOMPEL, M. (2007): *Internet der Dinge*, VDI Reihe, Berlin, Springer.
- BULLINGER, H.-J. ET AL. (2009): *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*, Berlin und Heidelberg, Springer Verlag.
- CAMARINHA-MATOS, L. M. & AFSARMANESH, H. (Hg.) (2008): *Collaborative Networks: Reference Modeling*, Heidelberg, Springer Verlag.
- CLAUSEN, U. & TEN HOMPEL, M. (2010): Facetten des Prozesskettenparadigmas, *Wege zur innovativen Fabrikorganisation, Band 4: Fabrikorganisation*, Verlag Praxiswissen, Dortmund.
- COENENBERG, A. G. & FISCHER, T. M. (1991): Prozeßkostenrechnung: strategische Neuorientierung in der Kostenrechnung, USW working paper: Universitätsseminar der Wirtschaft
- CONRAD, T. & ROOKS, R. (2010): *Turbo Flow. Using Plan for Every Part (PFEP) to Turbo Charge Your Supply Chain*, New York, Productivity Press.
- COOPER, R. S. & KAPLAN (1988): Measure Costs Right. Make the Right decisions, in: *Harvard Business Review* (September/Okttober 1988), S. 96–103.
- DERSTROFF, M. C. (1993): Lösung des dynamischen mehrstufigen Mehrproduktlosgrößenproblems mittels der Lagrange-Relaxation — Parametereinstellungen bei der Subgradientenoptimierung, in: *Operations Research Proceedings* 1993, S.150.
- DERSTROFF, M. C. (1994): Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen, Reihe: Produktion und Logistik, Dissertation, Heidelberg, Physica-Verlag.
- DICKMANN, P. (2009): *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen*, 2. Akt. u. erw. Aufl., Berlin, Springer.

DIN EN ISO 9000 ff.(2005): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005), Deutsche Norm, Düsseldorf: Beuth Verlag

DIXON, P.S. & SILVER, E.A. (1981): A heuristic solution procedure for the multi-item, single-level, limited capacity lot-sizing problem, *Journal of Operations Management* 2/1 S. 23-39.

DOMSCHKE, W. & DREXL, A. (1995): *Einführung in Operations Research*, 4. überarb. Aufl., Heidelberg, Springer.

DOMSCHKE, W. ET AL. (1997): *Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte*, 2. überarb. u. erw. Aufl., Heidelberg, Springer.

DREW, J. ET AL. (2005): *Unternehmen Lean – Schritte zu einer neuen Organisation*, Frankfurt & New York, Campus Verlag.

DREXL, A. & KIMMS, A. (1997): „Lot Sizing and Scheduling - Survey and Extensions“, in: *European Journal of Operational Research* 99 (1997), S. 221-235.

EGLI, J. (2001): *Transportkennlinien: Ein Ansatz zur Analyse von Materialflüssen*, Dortmund : Verlag Praxiswissen, Dortmund, Univ., Diss.

ERLACH, K. (2010): *Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik*, 2., bearb. u. erw. Aufl., Heidelberg, Springer.

ERLENKOTTER, D. (1990): „Ford Whitman Harris and the Economic Order Quantity Model“, in: *Operations Research* (38.6 Nov./Dez. 1990), S. 937-946.

EBIG, M. & WITT, M. (2009): *Öffentliche Logistik – Supply Chain Management für den öffentlichen Sektor*, Wiesbaden, Gabler.

EVERSHEIM, W. (1996): *Prozessorientierte Unternehmensorganisation. Konzepte und Methoden zur Gestaltung „schlanker“ Organisationen*, 2. Aufl. Heidelberg, Springer.

FASTABEND, H. (1997): *Kennliniengestützte Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen*, Düsseldorf, VDI Verlag.

FISCHERMANN, G. (2009): *Praxishandbuch Prozessmanagement* (ibo Schriftenreihe Bd. 9), Gießen, Götz Schmidt.

FLEISCHMANN, B. & MEYR, H. (1997), “The general lot-sizing and scheduling problem”, in: *OR Spektrum* 19, S. 11-21.

FLEISCHMANN, B. (1990), The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs, in: *European Journal of Operational Research* 75, S. 395-404.

FLEISCHMANN, B. (1994), The discrete lot-sizing and scheduling problem, in: *European Journal of Operational Research* 44, S. 337-348

FLORIAN, M, ET AL. (1980): “Deterministic Production Planning. Algorithms and Complexity”, in: *Management Science* 26.7, S.669-679.

FORD, H. & CROWTHER, S. (1922): *My Life and Work*, Garden City, New York, USA: Garden City Publishing Company, Inc.

- FUCHS, F. (2005): *Entwicklung eines Werkzeugs zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung für die Logistik*, Dissertation, TU Dortmund, Verlag Praxiswissen.
- FUNK, B. (2014): *Agile Entwicklung von Fabrikstrukturen in der variantenreichen Produktion auf Basis eines ganzheitlichen Strukturmodells*, Dissertation, Dortmund, Praxiswissen.
- GAITANIDES, M. (2006): *Prozessorganisation. Entwicklung, Ansätze und Programme des Managements von Geschäftsprozessen*, 2. überarb. Aufl., München, Vahlen.
- GAUSEMEIER, J. ET AL. (2009): *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, München & Wien: Hanser Verlag.
- GILLOT J.-N. (2008): *The Complete Guide to Business Process Management: Business Process Transformation or a Way of Aligning the Strategic Objectives of the Company and the Information System Through the Processes*, o.V.
- GIRI, B. C. & MOON, I. (2004): “Accounting for idle capacity cost in the scheduling of economic lot sizes”, in: *International Journal of Production Research* (42.4 2004), S.677-691.
- GOPALAKRISHNAN, M. ET AL (1995): A framework for modeling setup carryover in the capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Research* 33, S. 1973-1988.
- GÖPFERT, I. (2000): *Logistik - Führungskonzeption, Gegenstand, Aufgaben und Instrumente des Logistikmanagements und -controllings*, München, Vahlen.
- GROFF, G. K. (1979): A lot sizing rule for time-phased component demand. *Production and Inventory Management* 20/1 S.47-5.
- GRUNDIG, C.-G. (2009): *Fabrikplanung - Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. München, Hanser.
- GÜNTHER H. O. (1987): Planning lot sizes and capacity requirements in a single stage production system. *European Journal of Operational Research* 31, S.223-231.
- GÜNTHER, H.-O. & TEMPELMEIER, H. (2007): *Übungsbuch Produktion und Logistik*, 7. Aufl. Berlin, Springer.
- GÜNTNER, W. A. ET AL. (2006): Planung von Produktionsprozessen und Materialflusssteuerung, in: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hg.), *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Springer, S. 151 – 161.
- GÜNTNER, W. A. ET AL. (2013): *Schlanke Logistikprozesse*, Handbuch für den Planer, Berlin, Springer.
- HAHM, J. & YANO, C. A. (1992): The economic lot and delivery scheduling problem. The single item case, in: *International Journal of Production Economics* (28, 1992), S. 235-252.
- HAMMER, M. & CHAMPY, J. A. (1993): *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*, New York, Harper Business Books.

- HAMMER, M. (1996): *Beyond Reengineering: How the Process-Centered Organization Is Changing Our Work and Our Lives*, New York, Harper Collins.
- HANSSMANN, F. (1993): Einführung in die Systemforschung, Methodik der modellgestützten Entscheidungsvorbereitung, 4. Aufl. München.
- HANSSMANN, F. (1962): *Operations Research in Production and Inventory Control*, New York, John Wiley and Sons.
- HARRIS, C. (2004): *The Plan for Every Part*, Lean Enterprise Institute, NWlean Website, www.lean.org April 2004.
- HARRIS, F. W. (1913): How many parts to make at once, in *Factory. The Magazine of Management* 10, Februar 1913 S.135-136. Nachdruck in *Operations Research* 38, 1990, S.947-950.
- HARTBRICH, I. (2014): Industrie 4.0: In der Zukunftsfabrik, in *Die Zeit* Nummer 05/2014.
- HELBER, (1994): *Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS Systemen*. Stuttgart, M & P Verlag für Wissenschaft und Forschung.
- HELLINGRATH, B. (2002): *Entscheidungsunterstützung für die Auftragsablaufplanung*, Dissertation, Dortmund, Verlag Praxiswissen.
- HORVÁTH, P. & MAYER, R. (1989): Prozesskostenrechnung – Der neue Weg zu mehr Kostentransparenz und wirkungsvolleren Unternehmensstrategien, in: *Controlling* (1), S.214-219.
- HORVÁTH, P. ET AL. (1993): Prozesskostenrechnung – oder wie die Praxis die Theorie überholt, in *DBW* 53 (1993), 5, S. 609-628.
- HSU, W.-L. (1983): On the general feasibility test of scheduling lot sizes for several products on one machine, in: *Management Science* (29), S.93-105.
- JOCHM ET AL. (2010): *Prozessmanagement, Strategien, Methoden, Umsetzung*, 2. Aufl. Düsseldorf, Symposium Verlag.
- JUNG, H. (2010): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 12. aktualisierte Auflage, München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- JUNGMANN, T. & UYGUN, Y. (2010): Das Dortmunder Prozesskettenmodell in der Intralogistik, in: BANDOW, G. & H.H. HOLZMÜLLER (Hg.): *"Das ist gar kein Modell!" - Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften* Wiesbaden, Gabler, S. 357–382.
- KLAUS, G. und BUHR, M. (1975): Philosophisches Wörterbuch, 11.Aufl. Leipzig. Bibliographisches Institut.
- KLEVERS, T. (2007): Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design – Verschwendung erkennen – Wertschöpfung steigern. Landsberg am Lech: mi-Fachverlag.
- KLÖPPER, H.(1991): Logistikorientiertes strategisches Management. Erfolgspotentiale im Wettbewerb. TÜV Rheinland, Köln
- KOCH, S. (2011): *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen, Six Sigma, Kaizen und TQM*, Heidelberg, Springer.

- KOGAN K. ET AL. (2003): Infinite horizon production planning with periodic demand: solvable cases and a general numerical approach, in *IIE Transactions* 35, S. 61 –71.
- KRAMARKAR, U.S. & SCHRAGE, L. (1985): The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem, *Operations Research*, 33 (2), 326-345, 1985.
- KRCMAR, H. (2011): *Einführung in das Informationsmanagement*, Berlin, Springer.
- KRIEG, G. (2005): *Neue Erkenntnisse zu Andlers Losgrößenformel*, Arbeitspapier, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, <<http://www.praemienprogramme.de/mitarbeiter/gk/veroeffentlichungen/andlerformel/>>, Zugriff 21.8.2014.
- KRUMP, F. (2002): Diffusion prozessorientierter Kostenrechnungssysteme, State of the Art in der österreichischen Unternehmenspraxis, Dissertation, Wien, DUV.
- KÜHLING, M. (2000): Gestaltung der Produktionsorganisation mit Modell- und Methodenbausteinen. Dissertation, TU Dortmund, Lehrstuhl für Fabrikorganisation.
- KUHN, A. & HELLINGRATH, B. (2002): *Supply Chain Management – Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*, Berlin et al., Springer-Verlag.
- KUHN, A. (1992): Modellgestützte Logistik – Methodik einer permanenten ganzheitlichen Systemgestaltung, in: VDI (Hg.) *Rechnergestützte Fabrikplanung* (VDI-Berichte 949), Düsseldorf, VDI-Verlag.
- KUHN, A. (1995): *Prozessketten in der Logistik - Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien*, Dortmund, Verlag Praxiswissen.
- KUHN, A. (1999): *Prozesskettenmanagement, Erfolgsbeispiele aus der Praxis*, Reihe Unternehmenslogistik, Dortmund, Praxiswissen.
- KUHN, A. (2008): Prozessorientierte Sichtweise in Produktion und Logistik, in Arnold, D. et al. (Hg.), *Handbuch Logistik*, 3. Aufl., Berlin & Heidelberg, Springer Verlag, S.215 – 228.
- KUHN, A. ET AL. (2007): Neue Vorgehensmodelle zur prozessorientierten Logistikplanung, in: Wolf-Kluthausen (Hrsg.), *Jahrbuch der Logistik 2007*. Korschbroich, S. 246 – 251.
- LIKER, J. & MEIER, D. (2006): *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, Madison, WI, USA, McGraw-Hill.
- LÖDDING, H. (2008): *Verfahren der Fertigungssteuerung* (VDI Buch), Heidelberg, Springer Verlag.
- LOGICHAIN (2013): LogiChain – Logistik Prozesskostenrechnung. <http://www.logichain.com/> 10.11.2013.
- MARTICHENKO, R. & GRABE, K. (2010): *Building a Lean Fulfillment Stream: Rethinking Your Supply Chain and Logistics to Create Maximum Value at Minimum Total Cost*, Cambridge, USA, Lean Management Institute.
- MEYR, H. (1999): Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien, Reihe: Produktion und Logistik, Wiesbaden, Gabler.
- MÖSSNER, U. (1982): *Planung flexibler Unternehmensstrategien*, München.
- NEUGEBAUER, R. (2014): *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion*, München, Carl Hanser Verlag.

- NEUMANN, S. ET AL. (2005), Clemens: Kontinuierliches Prozessmanagement. In: Becker, Jörg; Kugeler, Martin; Rosemann, Michael (Hg.): *Prozessmanagement – Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. 5. überarb. und erw. Aufl., Berlin: Springer, S.299-325.
- NORDSIECK, F. (1934): *Grundlagen der Organisationslehre*, Stuttgart, o.V.
- NYHUIS, P. (1991): „Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung“, in: *Fortschritt-Berichte* (VDI, Reihe 2, Nr. 225) Düsseldorf, VDI Verlag.
- NYHUIS, P. (2008): Produktionskennlinien. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten, in Peter Nyhuis (Hg.), *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Berlin, Springer. S.185-218.
- NYHUIS, P. ET AL. (2010): Wandlungsfähigkeit. Ein systemischer Ansatz, in Peter Nyhuis (Hg.) *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, Berlin, Gito, S.3-21.
- OHNO, T. (1988), *Toyota Production System. Beyond Largescale Production*. (übersetzt von C.B. Rosen), New York, Productivity Press.
- OSTERLOH, MARGRIT & FROST, JETTA (2006), *Prozessmanagement als Kernkompetenz. Wie sie Business Reengineering strategisch nutzen können*, 5. überarb. Aufl., Wiesbaden, Gabler Verlag.
- PAETZ, V. (1986): Beitrag zur Gestaltung von Informationssystemen der Produktionslogistik, Institut für Logistik der Deutschen Gesellschaft für Logistik, 1986, Dortmund, Univ., Diss.
- PALUPSKI, R. (2002): *Management von Beschaffung, Produktion und Absatz mit zahlreichen Praxisbeispielen*, 2. Aufl. Wiesbaden, Gabler Verlag.
- PETERS, M., ET AL. (2014): Vorgehensweise zur Materialfluss- und Werkstrukturplanung durch einen PFEP Ansatz in *PRODUCTIVITY Management 5 / 2014*, Fokus Production Management, Berlin, Grin.
- PFEIFFER, W. & WEIß, E. (1991): *Lean-Management: Zur Übertragbarkeit eines neuen japanischen Erfolgsrezepts auf hiesige Verhältnisse* (Forschungs- und Arbeitsbericht Nr. 18 der Forschungsgruppe für Innovation und Technologische Voraussage), Nürnberg, o.V.
- PFEIFFER, W. & WEIß, E. (1994): *Lean-Management. Grundlagen der Führung und Organisation lernender Unternehmen*, überarb. und erw. Aufl., Berlin, Erich Schmidt Verlag.
- PIBERNIK, R. (2001): *Flexibilitätsplanung in Wertschöpfungsnetzwerken*, 1. Aufl. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.
- PIELOK, T. (1995): *Prozesskettenmodulation. Management von Prozessketten mittels Logistic Function Deployment*. Dissertation, TU Dortmund, Dortmund: Verlag Praxiswissen.
- PORTER, M. (1999): *Wettbewerbsvorteile. Spitzenleistungen erreichen und behaupten*. Campus-Verlag, Frankfurt.

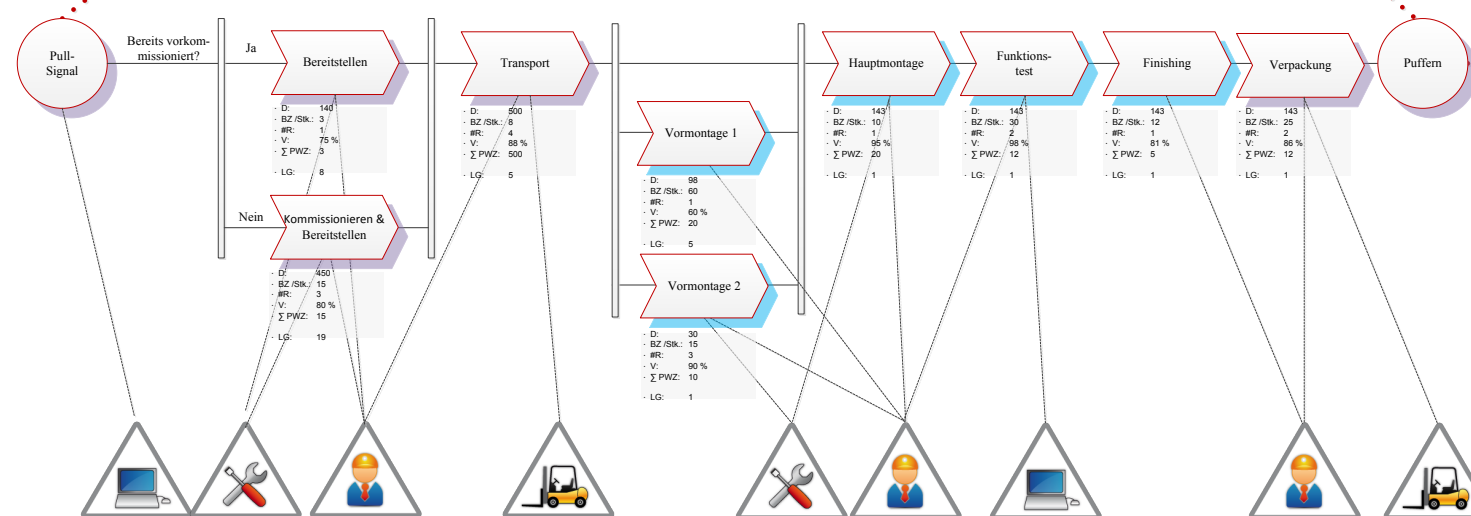
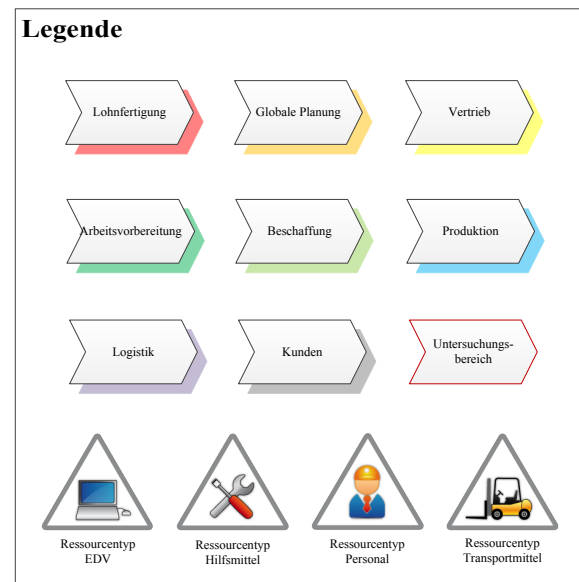
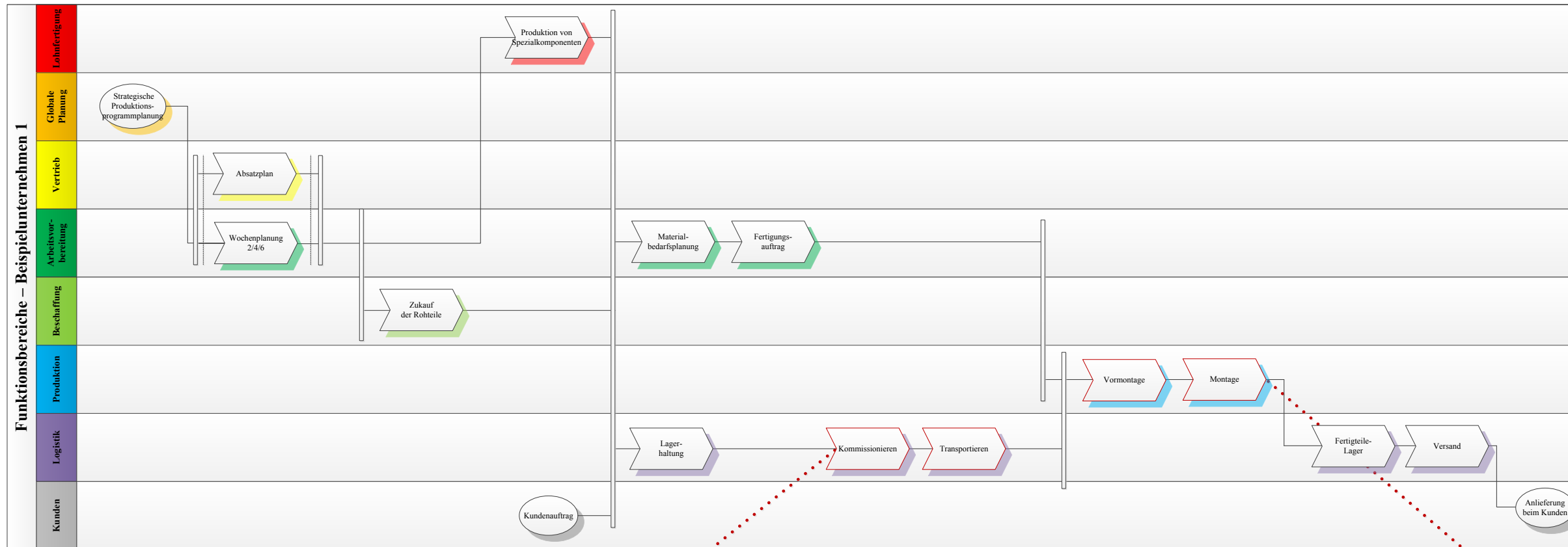
- PORTER, M. E. (1985): *Competitive Advantage – Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press.
- PRODUCTIVITY (1996): *The Productivity Press 1996, Quick Changeover for Operators Learning Package: Quick Changeover for Operators: The SMED System (Shopfloor Series)*, Portland, Productivity Inc.
- RECKENFELDERBÄUMER, M. (1998): *Entwicklungsstand und Perspektiven der Prozeßkostenrechnung* Auflage: 2.Aufl. Wiesbaden, Gabler Verlag.
- REICHWALD, R. ET AL. (2009): *Interaktive Wertschöpfung*, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- REITNER, S. (2007): *Optimale Steuerung von Rüst- und Produktionsprozessen*, Dissertation, Wien.
- ROBRADE, A. & ZOLLER K. (1987) : Dynamische Bestellmengen- und Losgrößenplanung. Verfahrensübersicht und Vergleich, In OR Spektrum 9, 1987 S.219-233 Hamburg, Springer.
- ROGERS, J. (1958): A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem, Page Range: 264 – 291 University of California, at Berkeley, Permalink: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.4.3.264> Published Online: April 1, 1958.
- ROTHER, M. & SHOOK, J. (2003): *Learning to See: Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*, Version 1.3, Cambridge, Lean Enterprise Institute.
- ROTHER, M. & SHOOK, J. (2006): *Sehen lernen – Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*, Aachen, Lean Management Institut, o.V.
- SCHEER, A.-W. (1995): *Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse*, 6. Aufl., Berlin et al., Hanser-Verlag.
- SCHLICK, J. & STEPHAN, P. (2012): Die vierte industrielle Revolution wird kommen in *Konstrukteur & Arbeitsplatz – Die Konstruktion der Zukunft* 05.2012. Landsberg.
- SCHMACKPFEFFER, A. & SCHEUING, C. (1986): Methoden zur Modellerstellung. Möglichkeiten eines Graphikeditors, in: ASIM (Hrsg.), *Simulationstechnik und Logistik*, Tagungsbericht 03. bis 04.06.1996 in Dortmund, München, Verlag gmft.
- SCHMELZER, H. J. & SESSELMANN, W. (2004): *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*, 4., erweiterte Auflage, München, Hanser Verlag.
- SCHMELZER, H. J. & SESSELMANN, W. (2010): *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*, 7., überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Hanser Verlag.
- SCHMELZER, H. J. & SESSELMANN, W. (2013): *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*, 8., überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Hanser Verlag.
- SCHNEIDER, M. (2004): *Logistische Fertigungsbereichskennlinien*, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- SCHOMBURG, E (1980): *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*, o.O.

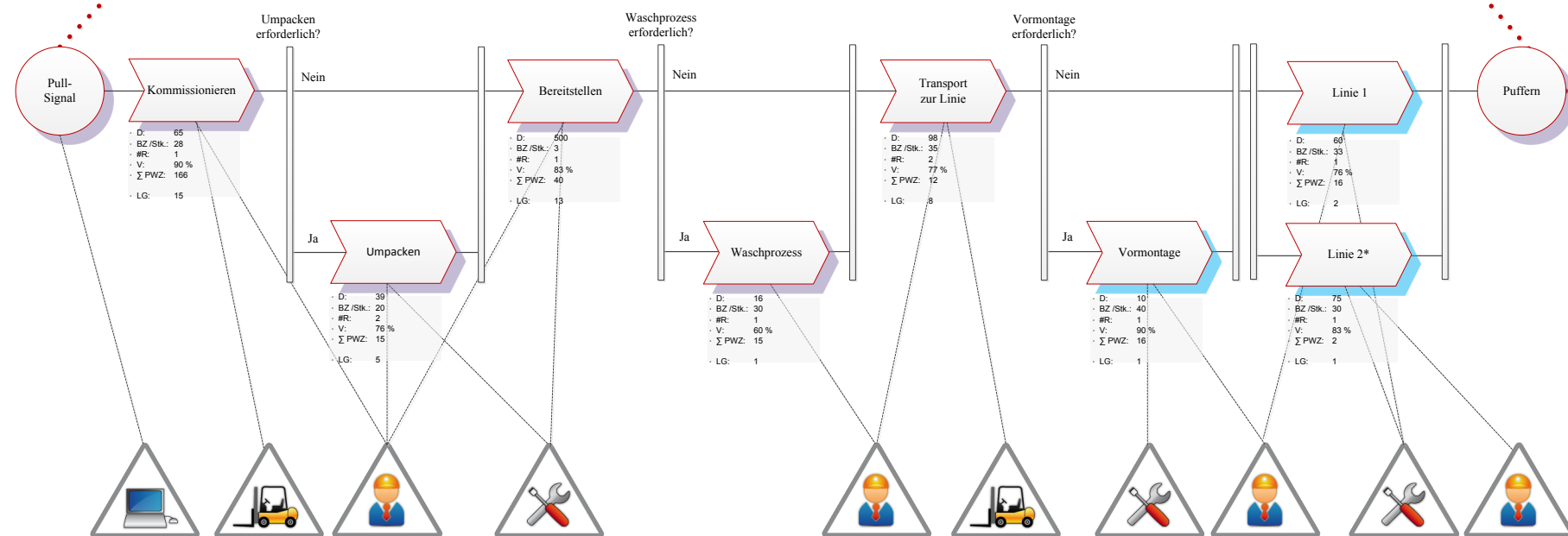
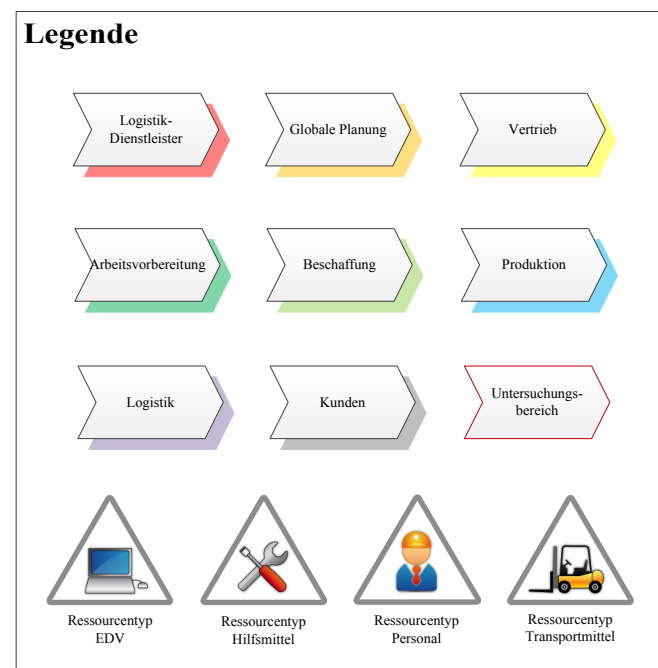
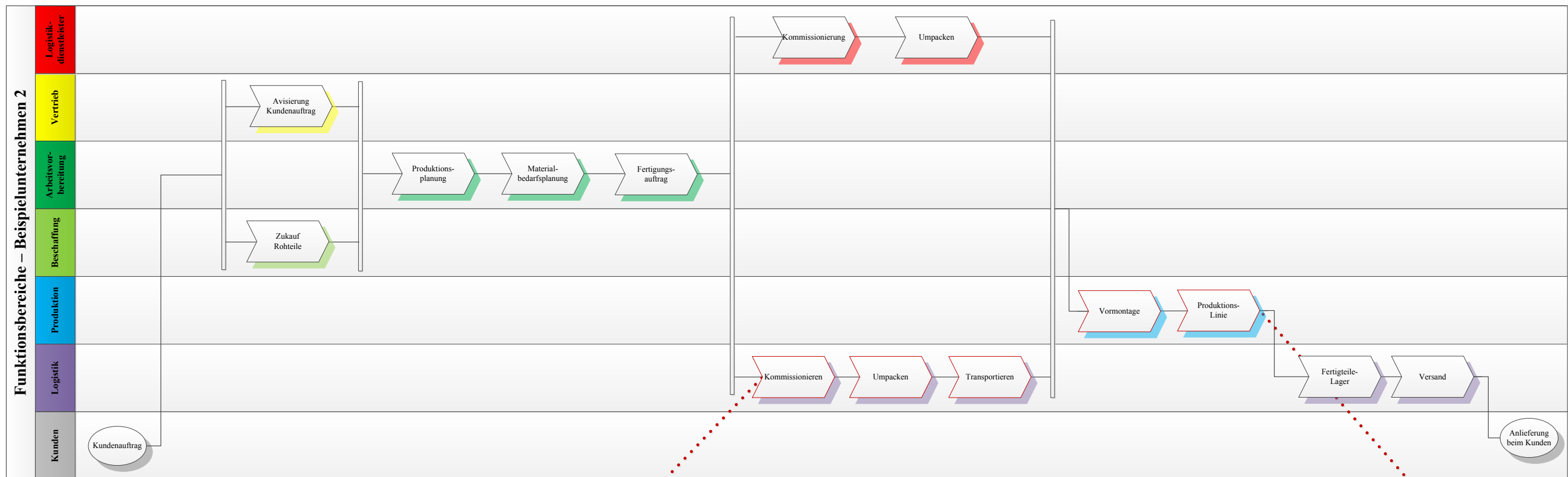
- SCHUH, G. ET AL. (2007): Effiziente Gestaltung der Montage im Maschinen- und Anlagenbau – Lean Production als Gestaltungsansatz, in: wt Werkstatttechnik online, 97 (2007) 9, S. 633 – 637.
- SILVER, E. A. & MEAL, H.C. (1973): A heuristic for selection lot-size quantities for the case of a deterministic time varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. *Production and Inventory Management* 12/2 S.64-74.
- SOMAN C. A. ET AL (2004): A basic period approach to the economic lot scheduling problem with shelf life considerations, *International Journal of Production Research*, 42 (8), S.1677-1689.
- SPATH, D. (2003): *Ganzheitlich produzieren, Innovative Organisation und Führung*, Auflage: 1., Aufl. Stuttgart, Logis.
- SPATH, D. (2008): Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Unternehmenserfahrungen, Forschungs- und Transferbedarfe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- SPEARMAN, M. L. & HOPP W. J. (1989): A Hierarchical Control Architecture for Constant Work-in-Process (CONWIP) Production Systems. *J. Mfg. Operations Management* 2 (1989) 3, S. 147-171.
- SUHL, L. & MELLOUL, T. (2005): *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen* Berlin, Springer.
- TAFT, E.W. (1918): *The Most Economical Production Lot*. Formulas for Exact and Approximate Evaluation – Handling Cost of Jigs and Interest Charges of Product Manufactured Included, *Iron Age* 101, S. 1410-1412.
- TAKEDA, H. (2012): *Das synchrone Produktionssystem – Just-in-Time für das ganze Unternehmen*, 7. Aufl., München, Franz-Vahlen Verlag.
- TEMPELMEIER, H. (2006): *Materiallogistik, Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*, 6. Aufl. Berlin, Springer.
- TEN HOMPEL, M. & HENKE, M. (2014): Logistik 4.0, in: Bauernhansl, Thomas (Hg.); ten Hompel, Michael (Hg.); Vogel-Heuser, Birgit (Hg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik : Anwendung, Technologien und Migration*. Berlin [u.a.] : Springer Vieweg, 2014, S. 615 - 624.
- TEN HOMPEL, M. (2010): Das Dortmunder Prozesskettenparadigma, in Clausen, U.; Ten Hompel, M.(Hg.) *Facetten des Prozesskettenparadigmas*, Reihe: Fabrikorganisation Band 4: Wege zur innovativen Fabrik, Dortmund, Praxiswissen, S.11-17.
- THIELEN, C. A. ET AL. (1993): *Management der Flexibilität - integriertes Anforderungskonzept für eine flexible Gestaltung der Unternehmung*, St. Gallen.
- VDI 3423 (2011): VDI-Richtlinie 3423 Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen Begriffe, Zeiterfassung und Berechnung. In: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hg.). Düsseldorf, Beuth Verlag.
- WAGNER, H. M. & WHITIN T. M. (1958): *Dynamic Version of the economic Lot Size Model*, *Management Science* 5, S.98-96.

- WESTKÄMPER, E. & ZAHN, E. (2009): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Heidelberg, Springer.
- WIENDAHL, H.-P ET AL. (2014): *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, München & Wien, Hanser.
- WIENDAHL, H.-P. (1996): Grundlagen der Fabrikplanung, in: EVERSHEIM, W. (Hrsg.), *Hütte - Produktion und Management* (Band 1), Berlin et al., Springer, S. (9-1)-(9-30).
- WIENDAHL, H.-P. (2008): „Prozessorientierte Sichtweise in Produktion und Logistik“, in: ARNOLD, D. ET AL. (Hrsg.), *Handbuch Logistik*, 3. Aufl., Berlin & Heidelberg, SpringerVerlag; S.228–248.
- WIENDAHL, H.-P. (2009): Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen – Ein morphologischer Ansatz, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (ZWF 104 2009), S.32–37.
- WIENDAHL, H.-P. ET AL. (2002): Planung wandlungsfähiger Fabriken. Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements, in: *ZWF* (2002a, ½, 97); S.12–17.
- WILDEMAN, H. (2007): *Fertigungssegmentierung – Leitfaden zur fluss- und logistikkongruenten Fabrikgestaltung*. München, TCW-Tranfer-Centrum.
- WINZ, G. & QUINT, M. (1997): *Prozesskettenmanagement - Leitfaden für die Praxis*, Dortmund, Verlag Praxiswissen.
- WINZ, G. (1996): *Methodik zur Verbesserung der logistischen Qualität. Ein Beitrag zum logistischen Qualitätsmanagement*. Verlag Praxiswissen, Dortmund.
- WOMACK, J. P & JONES, D. T. (2004): *Lean Thinking – Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern*, 2. Aufl., Frankfurt am Main, Campus Verlag.
- WOMACK, J. P. & JONES (1996): *Lean Thinking : Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, New York, Productivity Press; 1st edition (September 9, 1996).
- WOMACK, J. P. ET AL. (1990): *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*, New York, Free Press.
- ZÄPFEL, G. (2001): *Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement, Internationale Standardlehrbücher Der Wirtschafts- Und Sozialwissenschaften*,; 2. unwesentlich veränderte Auflage, Oldenbourg, Wissenschaftsverlag.
- ZIMMERMANN ET AL. (2003): *Betriebliches Rechnungswesen*, 8. Überarb. und erw. Aufl. München, Oldenbourg.
- ZSIFKOVITS, H. E. (2012): *Logistik*, UTB, Konstanz, UVK Verlag.

8 Anhang

8.1 Prozessketten der Praxisbeispiele





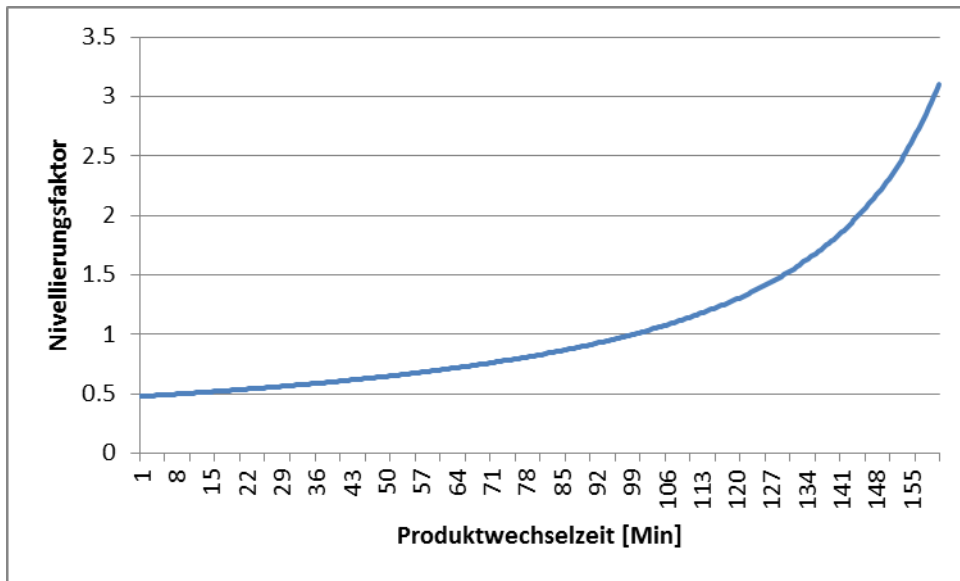
Praxisorientierte Anwendung – Beispiel 2 *Produktionslinien 3 und 4 wurden zugunsten der Darstellungsform nicht dargestellt.

8.2 Ergänzendes Material

Modell	EOQ	EPL	SLULSP	ELSP	CLSP, CSLP	DLSP, PLSP	GLSP	MLCSLP
Planungszeitraum	Stetig, unendlich	Stetig, unendlich	Diskret, endlich	Stetig, unendlich	Diskret, endlich	Diskret, endlich	Diskret, endlich	Diskret, endlich
Anzahl betrachteter Produktionsstufen	1	1	1	1	1	1	1	n
Anzahl betrachteter Produkte	1	1	1	n	n	n	n	n
Kapazitäten	Unbeschränkt	Beschränkt	Unbeschränkt	Beschränkt	Beschränkt	0 oder C	Beschränkt	Beschränkt
Lieferverzug / Fehlmengen	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Zielgrößen	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten	Lager- und Rüstkosten, sowie variable Produktionskosten
Bedarf	Konstant, statisch	Konstant, statisch	Dynamisch	Konstant, statisch	Dynamisch	Dynamisch	Dynamisch	Dynamisch
Rüstkosten	Konstant, pro Los	Konstant, pro Los	Dynamisch, pro Periode	Konstant pro Los	Dynamisch, pro Periode	Dynamisch, pro Los	Dynamisch, pro Periode und Los	Dynamisch, pro Los
Rüstzeit	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Lösungsverfahren	Harris, Andler	Taft 1918	Wagner-Whitin, Groff, LUC, PPB, Silver-Meal, Losgroessen Saving Verfahren	Bromberger, Park/Yun, Lagrange- Ansatz, Haessler, Dobson	Salomon 1991, Derstroff 1995	Fleischmann, Drexl/Haase	Fleischmann/ Meyr	

Gegenüberstellung der in Kapitel 2 vorgestellten Losgrößenmodelle (vollständige Darstellung).

Produktwechselzeit	NF	Produktwechselzeit	NF	Produktwechselzeit	NF	Produktwechselzeit	NF
0.5	0.47745358	40.5	0.60606061	80.5	0.82949309	120.5	1.31386861
1	0.4787234	41	0.60810811	81	0.83333333	121	1.32352941
1.5	0.48	41.5	0.61016949	81.5	0.8372093	121.5	1.33333333
2	0.48128342	42	0.6122449	82	0.8411215	122	1.34328358
2.5	0.48257373	42.5	0.61433447	82.5	0.84507042	122.5	1.35338346
3	0.48387097	43	0.61643836	83	0.8490566	123	1.36363636
3.5	0.4851752	43.5	0.6185567	83.5	0.85308057	123.5	1.3740458
4	0.48648649	44	0.62068966	84	0.85714286	124	1.38461538
4.5	0.48780488	44.5	0.62283737	84.5	0.86124402	124.5	1.39534884
5	0.48913043	45	0.625	85	0.86538462	125	1.40625
5.5	0.49046322	45.5	0.6271777	85.5	0.86956522	125.5	1.41732283
6	0.49180328	46	0.62937063	86	0.87378641	126	1.42857143
6.5	0.49315068	46.5	0.63157895	86.5	0.87804878	126.5	1.44
7	0.49450549	47	0.63380282	87	0.88235294	127	1.4516129
7.5	0.49586777	47.5	0.6360424	87.5	0.88669951	127.5	1.46341463
8	0.49723757	48	0.63829787	88	0.89108911	128	1.47540984
8.5	0.49861496	48.5	0.6405694	88.5	0.89552239	128.5	1.48760331
9	0.5	49	0.64285714	89	0.9	129	1.5
9.5	0.50139276	49.5	0.64516129	89.5	0.90452261	129.5	1.51260504
10	0.5027933	50	0.64748201	90	0.90909091	130	1.52542373
10.5	0.50420168	50.5	0.64981949	90.5	0.91370558	130.5	1.53846154
11	0.50561798	51	0.65217391	91	0.91836735	131	1.55172414
11.5	0.50704225	51.5	0.65454545	91.5	0.92307692	131.5	1.56521739
12	0.50847458	52	0.65693431	92	0.92783505	132	1.57894737
12.5	0.50991501	52.5	0.65934066	92.5	0.93264249	132.5	1.59292035
13	0.51136364	53	0.66176471	93	0.9375	133	1.60714286
13.5	0.51282051	53.5	0.66420664	93.5	0.94240838	133.5	1.62162162
14	0.51428571	54	0.66666667	94	0.94736842	134	1.63636364
14.5	0.51575931	54.5	0.66914498	94.5	0.95238095	134.5	1.65137615
15	0.51724138	55	0.67164179	95	0.95744681	135	1.66666667
15.5	0.51873199	55.5	0.6741573	95.5	0.96256684	135.5	1.68224299
16	0.52023121	56	0.67669173	96	0.96774194	136	1.69811321
16.5	0.52173913	56.5	0.67924528	96.5	0.97297297	136.5	1.71428571
17	0.52325581	57	0.68181818	97	0.97826087	137	1.73076923
17.5	0.52478134	57.5	0.68441065	97.5	0.98360656	137.5	1.74757282
18	0.52631579	58	0.6870229	98	0.98901099	138	1.76470588
18.5	0.52785924	58.5	0.68965517	98.5	0.99447514	138.5	1.78217822
19	0.52941176	59	0.69230769	99	1	139	1.8
19.5	0.53097345	59.5	0.69498069	99.5	1.00558659	139.5	1.81818182
20	0.53254438	60	0.69767442	100	1.01123596	140	1.83673469
20.5	0.53412463	60.5	0.70038911	100.5	1.01694915	140.5	1.8556701
21	0.53571429	61	0.703125	101	1.02272727	141	1.875
21.5	0.53731343	61.5	0.70588235	101.5	1.02857143	141.5	1.89473684
22	0.53892216	62	0.70866142	102	1.03448276	142	1.91489362
22.5	0.54054054	62.5	0.71146245	102.5	1.04046243	142.5	1.93548387
23	0.54216867	63	0.71428571	103	1.04651163	143	1.95652174
23.5	0.54380665	63.5	0.71713147	103.5	1.05263158	143.5	1.97802198
24	0.54545455	64	0.72	104	1.05882353	144	2
24.5	0.54711246	64.5	0.72289157	104.5	1.06508876	144.5	2.02247191
25	0.54878049	65	0.72580645	105	1.07142857	145	2.04545455
25.5	0.55045872	65.5	0.72874494	105.5	1.07784431	145.5	2.06896552
26	0.55214724	66	0.73170732	106	1.08433735	146	2.09302326
26.5	0.55384615	66.5	0.73469388	106.5	1.09090909	146.5	2.11764706
27	0.55555556	67	0.73770492	107	1.09756098	147	2.14285714
27.5	0.55727554	67.5	0.74074074	107.5	1.10429448	147.5	2.1686747
28	0.55900621	68	0.74380165	108	1.11111111	148	2.19512195
28.5	0.56074766	68.5	0.74688797	108.5	1.11801242	148.5	2.22222222
29	0.5625	69	0.75	109	1.125	149	2.25
29.5	0.56426332	69.5	0.75313808	109.5	1.13207547	149.5	2.27848101
30	0.56603774	70	0.75630252	110	1.13924051	150	2.30769231
30.5	0.56782334	70.5	0.75949367	110.5	1.14649682	150.5	2.33766234
31	0.56962025	71	0.76271186	111	1.15384615	151	2.36842105
31.5	0.57142857	71.5	0.76595745	111.5	1.16129032	151.5	2.4
32	0.57324841	72	0.76923077	112	1.16883117	152	2.43243243
32.5	0.57507987	72.5	0.77253219	112.5	1.17647059	152.5	2.46575342
33	0.57692308	73	0.77586207	113	1.18421053	153	2.5
33.5	0.57877814	73.5	0.77922078	113.5	1.19205298	153.5	2.53521127
34	0.58064516	74	0.7826087	114	1.2	154	2.57142857
34.5	0.58252427	74.5	0.7860262	114.5	1.20805369	154.5	2.60869565
35	0.58441558	75	0.78947368	115	1.21621622	155	2.64705882
35.5	0.58631922	75.5	0.79295154	115.5	1.2244898	155.5	2.68656716
36	0.58823529	76	0.79646018	116	1.23287671	156	2.72727273
36.5	0.59016393	76.5	0.8	116.5	1.24137931	156.5	2.76923077
37	0.59210526	77	0.80357143	117	1.25	157	2.8125
37.5	0.59405941	77.5	0.80717489	117.5	1.25874126	157.5	2.85714286
38	0.59602649	78	0.81081081	118	1.26760563	158	2.90322581
38.5	0.59800664	78.5	0.81447964	118.5	1.27659574	158.5	2.95081967
39	0.6	79	0.81818182	119	1.28571429	159	3
39.5	0.60200669	79.5	0.82191781	119.5	1.29496403	159.5	3.05084746
40	0.60402685	80	0.82568807	120	1.30434783	160	3.10344828



Verlauf des Nivellierungsfaktors in Abhängigkeit der Produktwechselzeit