

Entwicklung eines Modells zur Analyse und Optimierung der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund von Einzelanlagen in der Prozessindustrie

Dissertation
von
Dipl.-Ing. Kristin Samac



eingereicht am
Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften
der
Montanuniversität Leoben

Leoben, November 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources and resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Leoben, November 2015

(Kristin Samac)

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Das Verfassen einer wissenschaftlichen Arbeit ist alleine nicht durchführbar. Ohne die vielfältige Unterstützung des Lehrstuhls Wirtschafts- und Betriebswissenschaften (WBW) der Montanuniversität Leoben, die Zusammenarbeit mit der Austria Metall AG und dem privaten Rückhalt meiner Familie und meiner Freunde wäre es mir nicht möglich gewesen diese Arbeit fertig zu stellen.

Ein herzliches Dankeschön geht an Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Hubert Biedermann, der mir als Betreuer und wissenschaftlicher Lehrer die Chance gegeben hat am WBW meine Arbeit durchzuführen. Seine wertvollen Anregungen und wissenschaftlichen Diskussionen, sowie kritischen Hinterfragungen während des Dissertationsprozesses waren eine große Unterstützung.

Für die Möglichkeit der praktischen Anwendung und die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich herzlich bei dem Team der Austria Metall AG in Ranshofen. Herr Dipl.-Ing. Anton Eberle ermöglichte mir durch seine Unterstützung, sein fachliches Input und seine Aufgeschlossenheit die Entwicklung und Anwendung meines Modells. Gemeinsam mit den Herrn Josef Schnitzlbaumer und Ing. Christoph Lobe führte ich viele konstruktive Diskussionen, die meine Arbeit positiv prägten. Dafür spreche ich Ihnen meinen Dank aus.

Ein spezieller Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften. Durch die fachlichen Gespräche, motivierenden Worte und zahlreichen Diskussionen haben sie einen Beitrag zur Entstehung und Vollendung meiner Dissertation geleistet.

Meinen Eltern Klaus und Karin sowie meiner Schwester Judith gilt mein ganz besonderer Dank. Ihr grenzenloser Rückhalt, die aufbauenden Worte und die Bereitschaft sich alles anzuhören, was mich beschäftigt, haben mich gestärkt und ermutigt. Sie haben mir Kraft gegeben mein Ziel durch alle Höhen und Tiefen hindurch zu erreichen.

Meinem Freund Henrik gebührt ebenfalls ein großes Dankeschön. Er hat meine Erfolge mit mir gefeiert und meine Rückschläge erträglich gemacht. Die Entbehungen, die er während der Erstellung meiner Arbeit durchleben musste, hat er ohne Vorwürfe und mit stetem Verständnis ertragen.

*"Für jemanden, der sich sein Leben lang bemüht hat
ein klein bisschen von der Wahrheit zu erfassen,
ist es die schönste Belohnung, wenn er sieht,
dass andere sein Werk wirklich verstehen und sich daran freuen."
Albert Einstein (1879-1955), deutscher Physiker*

Kurzfassung

Die Marktforderung nach kundenspezifischen Produkten und hoher Lieferfähigkeit zwingt viele Unternehmen flexibel und in kleinen Losen zu fertigen. Dies treibt die Bestände in den Prozessen in die Höhe und bindet Kapital. Das Ziel der Unternehmen muss sein, die Bestände auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig eine ökonomische Anlagenauslastung zu erhalten um die Kapitalproduktivität von Anlage und Bestand zu optimieren. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Es soll ein Wirkmodell zur Analyse der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund von Einzelanlagen entwickelt und in Folge weitere Analysemodelle, -methoden, oder Kennzahlen angegeben werden anhand dessen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Zudem liegt der Fokus auf Unternehmen der Prozessindustrie, die durch Besonderheiten in der Produktion eine hoch komplexe Ausgangssituation darstellen.

Zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung wurde ein Wirkmodell entwickelt, in welchem das Modell der Produktionskennlinie und die Gesamtanlageneffektivität kombiniert sind. Dadurch werden die Auswirkungen einer Verbesserung der Anlageneffektivität auf den idealen Bestand vor der Anlage und die durchschnittliche Leistung der Anlage sichtbar. Um aus den Ergebnissen dieses Wirkmodells Optimierung ableiten zu können, wird eine Analysepyramide präsentiert. Diese gibt weitere Analysen sowie Normstrategien und Vorschläge für Maßnahmen zur Optimierung der Anlageneffektivität und der Bestandssituation an. Die Umsetzung des Wirkmodells wird anhand eines Fallbeispiels aus der Aluminiumindustrie exemplarisch dargestellt.

Abstract

The market demand for customized products and high delivery capacity is forcing many companies to manufacture flexibly and in small lots. This leads to high levels of work in process and capital costs. Companies have to reduce stocks to a minimum, while maintaining an economical system utilization in order to optimize the capital productivity of system and stock. The aim of this doctoral thesis is to develop a model to analyze the capital productivity of the system-stock-bond of single systems and to provide further analysis and improvement potential. Furthermore this thesis focuses on enterprises in the process industry, which represent a highly complex initial situation.

To answer the research question a model was developed, in which the model of operation curves and the overall equipment effectiveness are combined. Thus, the effects of improving system efficiency to the ideal stock and the average performance of the system are displayed. In order to deduce improvement activities from the results of this model, an analysis-pyramid is presented. This indicates further analysis, standard strategies and proposals for activities to optimize system efficiency and stock. The implementation of this model is exemplified with a case study conducted in the aluminum industry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problematik	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
1.4	Methodische Vorgehensweise	7
2	Wissenschaftstheoretische Grundlagen	9
2.1	Entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre	9
2.2	Der entscheidungsorientierte Ansatz der Betriebswirtschaftslehre	10
2.3	Modellbildungstheorie	13
2.3.1	Modellarten	14
2.3.2	Prozess der Modellbildung	18
2.4	Systemtheorie	19
2.4.1	Grundlagen und Merkmale von Systemen	19
2.4.2	Systemdenken	21
2.4.3	Betrachtungsperspektiven	21
2.5	Komplexitätstheorie	23
2.5.1	Komplexität und -theorie	23
2.5.2	Dimensionen der Komplexität	24
2.6	Zusammenfassung und Forschungsdesign	27
3	Grundlagen der Produktionswirtschaft	28
3.1	Zentrale Begriffe	28
3.2	Produktionsplanung	30
3.3	Die Produktion in der Prozessindustrie	33
3.3.1	Besonderheiten der Prozessindustrie	34
3.3.2	Komplexität von Produktionssystemen der Prozessindustrie	37
3.4	Methoden für das operative Management	39
3.4.1	Lean Management	39
3.4.2	Kaizen und KVP	40
3.4.3	Theory of Constraints	41
3.4.4	Total Productive Maintenance	42
3.5	Gesamtanlageneffektivität	43

3.6	Logistische Zielgrößen	46
3.6.1	Auftragszeit und Durchführungszeit.....	46
3.6.2	Durchlaufzeit	48
3.7	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm	50
3.7.1	Leistung und Auslastung	51
3.7.2	Bestand und Reichweite.....	52
3.8	Zusammenfassung	53
4	Produktionskennlinien	54
4.1	Dilemma der Ablaufplanung	54
4.2	Begriffsklärung	55
4.3	Ideale Produktionskennlinie	57
4.4	Reale Produktionskennlinie.....	59
4.4.1	Näherungsgleichung	60
4.4.2	Berechnung der Produktionskennlinie	62
4.4.3	Streckfaktor α_1	63
4.5	Kritische Würdigung vorhandener Modellierungsansätze von Produktionskennlinien	67
4.5.1	Warteschlangentheorie	67
4.5.2	Simulation	70
4.6	Diskussion der Produktionskennlinie als Bestandteil des Wirkmodells	71
4.7	Zusammenfassung	73
5	Konzeption und Entwicklung des Wirkmodells und der davon ausgehenden Analyselandschaft.....	74
5.1	Systemabgrenzung	74
5.2	Kombination Produktionskennlinienmodell - Gesamtanlageneffektivität	75
5.2.1	Einwirkung der Verfügbarkeit	77
5.2.2	Einwirkung des Leistungsgrades	78
5.2.3	Einwirkung der Qualitätsrate	79
5.3	Analysepyramide – modellbasierter Ansatz zur Optimierung der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund.....	80
5.3.1	Effektivitätsportfolios	81
5.3.2	Maßnahmen zur Effektivitätssteigerung.....	84
5.3.3	Abweichungsanalyse.....	87
5.3.4	Auftragsfreigabe.....	87
5.4	Zusammenfassung	92

6	Fallstudie zur Darstellung des entwickelten Modells	94
6.1	Ausgangssituation.....	94
6.2	Zielsetzung	97
6.3	Untersuchungsdesign	97
6.4	Beispielhafte Darstellung von aggregatspezifischen Erkenntnissen	99
6.4.1	Längsteilschere Bronx.....	101
6.4.2	Horizontalvergüteofen 1	104
6.4.3	Streckrichtanlage	107
6.4.4	Weitere Analysen am Beispiel Längsteilschere Bronx	108
6.5	Schlussfolgerungen	110
7	Abschließende Betrachtung und Resümee	113
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Ausblick	115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgangssituation	2
Abbildung 2: Morphologie des zu entwickelten Modells	4
Abbildung 3: Struktureller Aufbau der Dissertation	6
Abbildung 4: Konzept der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre	11
Abbildung 5: Allgemeine Merkmale von Modellen	14
Abbildung 6: Warteschlangenmodell	16
Abbildung 7: Prozess der Modellentwicklung und -analyse	18
Abbildung 8: Grundbegriffe eines Systems.....	20
Abbildung 9: Blackbox mit Input-Output-Beziehung.....	22
Abbildung 10: Produktionssystem	29
Abbildung 11: Portfolio für Produktionsprozesse und Anlagentypen.....	36
Abbildung 12: Taylor's Typologien	37
Abbildung 13: Wertschöpfungskette in der Aluminiumindustrie.....	38
Abbildung 14: KVP	40
Abbildung 15: Zusammensetzung OEE.....	44
Abbildung 16: a) Durchlaufplan eines Produktionsauftrages, b) arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement	49
Abbildung 17: a) Trichtermodell, b) Durchlaufdiagramm.....	51
Abbildung 18: Dilemma der Ablaufplanung.....	54
Abbildung 19: Darstellung der Betriebszustände	56
Abbildung 20: Optimierungspotenzial im Modell der Produktionskennlinie	57
Abbildung 21: Herleitung einer idealen Produktionskennlinie	58
Abbildung 22: Parameter einer realen Produktionskennlinie.....	60
Abbildung 23: Vier Schritte der Transformation der CNorm-Funktion zur mathematischen Beschreibung von Leistungskennlinien.....	62
Abbildung 24: Produktionskennlinien bei Variation des Streckfaktors.....	64
Abbildung 25: Modellevaluation auf Basis betrieblicher Rückmeldedaten.....	64
Abbildung 26: Einfluss der Belastungsstreuung und der Kapazitätsflexibilität auf den Streckfaktor	65

Abbildung 27: Grenzauslastungsfläche zur Beschreibung der Belastungsstreuung.....	66
Abbildung 28: Systemabgrenzung.....	74
Abbildung 29: Wirkmodell – Entwicklungsstufe 1.....	75
Abbildung 30: Wirkmodell – Entwicklungsstufe 2.....	76
Abbildung 31: Wirkmodell – Änderung Verfügbarkeit.....	77
Abbildung 32: Wirkmodell – Änderung Leistungsgrad	79
Abbildung 33: Analysepyramide	80
Abbildung 34: Zuordnung der Verlustquellen.....	81
Abbildung 35: Effektivitätsportfolio Verfügbarkeit.....	82
Abbildung 36: Effektivitätsportfolio Leistungsgrad.....	83
Abbildung 37: Effektivitätsportfolio Qualitätsrate.....	84
Abbildung 38: Durchlaufmodell der BOA.....	88
Abbildung 39: Produktionslinie mit hybrider Kanban-Conwip-Steuerung	90
Abbildung 40: Konzept der Dezentralen Bestandsorientierten Fertigungsregelung.....	91
Abbildung 41: Modellbasierter Ansatz	93
Abbildung 42: Luftaufnahme AMAG Austria Metall AG.....	94
Abbildung 43: Prozessablauf AMAG Rolling.....	95
Abbildung 44: Auftragsstruktur	96
Abbildung 45: Vorgehensmodell.....	98
Abbildung 46: Layout AMAG	100
Abbildung 47: Auswertung Analysemodell Längsteilschere Bronx, Oktober 2013.....	101
Abbildung 48: Auswertung Wirkmodell Längsteilschere Bronx, Oktober 2013	102
Abbildung 49: Auswertung Analysemodell Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013	104
Abbildung 50: Auswertung Analysemodell Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013, 99% Auslastung.....	105
Abbildung 51: Auswertung Wirkmodell Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013	105
Abbildung 52: Auswertung Analysemodell Streckrichtanlage, Oktober 2013	107
Abbildung 53: Auswertung Wirkmodell Streckrichtanlage, Oktober 2013.....	108
Abbildung 54: Verfügbarkeitsportfolio Längsteilschere Bronx	109
Abbildung 55: Anlagenvergleich im Verfügbarkeitsportfolio	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation der Modelle anhand ihrer Zielsetzung.....	14
Tabelle 2: Materialflussarten	29
Tabelle 3: Beziehungen zwischen In- und Output.....	30
Tabelle 4: Charakteristiken von Fertigungsarten in der Prozessindustrie.....	34
Tabelle 5: PDCA-Zyklus	41
Tabelle 6: Berechnung Faktoren für OEE	45
Tabelle 7: Abkürzungen der Verteilungen der Ankunftsabstände und Bedienzeiten	69
Tabelle 8: Instrumente des Qualitätsmanagements	85
Tabelle 9: Ergebnisse Längsteilschere Bronx, Oktober 2013	102
Tabelle 10: Mögliche Verbesserung Längsteilschere Bronx, Oktober 2013	103
Tabelle 11: Reduktion des Bestandes Längsteilschere Bronx, Oktober 2013	103
Tabelle 12: Ergebnisse Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013.....	106
Tabelle 13: Mögliche Verbesserung Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013.....	106
Tabelle 14: Reduktion des Bestandes Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013	107
Tabelle 15: Werte Verfügbarkeitsportfolio.....	109

Abkürzungsverzeichnis

Abkür- zung	Bedeutung
------------------------	------------------

AMAG	Austria Metall AG
BDE	Betriebsdatenerfassung
BOA	Belastungsorientierten Auftragsfreigabe
DBF	Dezentrale Bestandorientierte Fertigungsregelung
DV	Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In First Out
IH	Instandhaltung
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LG	Leistungsgrad
LIFO	Last In First Out
MES	Manufacturing Execution System
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PDCA	Plan, Do, Check, Act
PKL	Produktionskennlinie
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PRIMA	Process Industries Manufacturing Advantage
PRIO	Auswahl gemäß Prioritäten
QR	Qualitätsrate
SIRO	Service In Random Order
SMED	Single Minute Exchange of Die
SPT	Shortest Processing Time
TEI	Total Employee Involvement

TOC	Theory of Constraints
TPM	Total Productive Maintenance
TQM	Total Quality Management
VK	Verfügbarkeit
WBW	Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften
WIP	Work in Process

Dimensionsangaben

Einheit	Bedeutung
---------	-----------

ANZ	Anzahl
BKT	Betriebskalendertag
ME	Mengeneinheit
Std	Stunden
Stk	Stück

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	(%)	Auslastung
B	(Std)	Bestand
B_B	(Std)	Mittlerer Bestand bei Auftragsbearbeitung
$B_{I_{min}}$	(Std)	Idealer Mindestbestand
$BKAP_V$	(Std/BKT)	Verfügbare Betriebsmittelkapazität
B_P	(Std)	Mittlerer Pufferbestand
C	(-)	Funktionsparameter der C_{Norm} -Funktion
F	(BKT)	Durchlaufzeit (Little's Law)
FG	(-)	Flussgrad

FZ	(Std · BKT)	Durchlaufzeitfläche
KAP	(Std/BKT)	Kapazität
L	(Std/BKT)	Leistung
L_{\max}	(Std/BKT)	Maximal mögliche (mittlere) Leistung
m	(-)	Anzahl Arbeitsstationen
n	(-)	Anzahl auszuwertender Ergebnisse
N	(-)	Anzahl Aufträge im System (Little's Law)
P	(BKT)	Bezugszeitraum (Periode)
$PKAP_N$	(Std/BKT)	Nutzbare Personalkapazität
R	(BKT)	Reichweite
t	(-)	Laufvariable in der Kennlinientheorie ($0 \leq t \leq 1$)
t_e	(min/ME)	Einzelzeit je Mengeneinheit (Vorgabezeit)
t_r	(min)	Rüstzeit je Arbeitsvorgang (Vorgabezeit)
U	(Std/BKT)	Leistung einer Arbeitsstation (Little's Law)
WBZ	(BKT)	Wiederbeschaffungszeit
x	(ME)	Losgröße
ZAU	(Std)	Auftragszeit
ZDA	(BKT)	Durchlaufzeit Auftrag
ZDF	(BKT)	Durchführungszeit
ZDL	(BKT)	Durchlaufzeit (Arbeitsvorgang)
ZTR	(min, Std, BKT)	Transportzeit
ZU	(Std)	Zugang
ZUE	(BKT)	Übergangszeit (Arbeitsvorgang)
α	(-)	Streckfaktor in der Kennlinientheorie

1 Einleitung

„Man merkt nie, was schon getan wurde, man sieht immer nur, was noch zu tun bleibt.“

Marie Curie (1867-1934), polnisch-französische Physikerin und Chemikerin

Das erste Kapitel dieser Arbeit beinhaltet die Einführung in die Problematik. Dazu wird im ersten Abschnitt die Ausgangssituation inklusive Problemstellung erläutert. Im zweiten Abschnitt wird auf die Zielsetzung näher eingegangen und die Forschungsfrage abgeleitet. Der Aufbau der Arbeit wird skizziert und im letzten Abschnitt ist das methodische Vorgehen beschrieben.

1.1 Ausgangssituation und Problematik

Kunden und kundenspezifische Leistungen, bzw. individuellere Fertigungsaufträge sind, neben dem Preis, die entscheidenden Kriterien im Wettbewerb um Marktanteile.¹ Eine branchenübergreifende Studie des BVL (Bundesvereinigung Logistik) zeigt, dass im Mittelpunkt der strategischen Unternehmensausrichtung die Befriedigung der Kundenbedürfnisse und ein zuverlässiges und reaktionsfähiges Logistiksystem stehen.² Sich dynamisch ändernde Umweltfaktoren und laufende Veränderungen von Angebot und Nachfrage bilden ein turbulentes Umfeld.³ Unternehmen in diesem turbulenten und dynamischen Umfeld müssen eine umfangreiche Produktvielfalt und Flexibilität anbieten um langfristig erfolgreich zu sein. Gleichzeitig fordert der Markt einen hohen Grad an Lieferfähigkeit und Lieferflexibilität. Somit steigt die dynamische und strukturelle Komplexität von Produktionssystemen an.⁴ Das logistische Dreieck aus Kosten, Qualität und Zeit muss weiterhin berücksichtigt werden. Dabei ist entscheidend, die Produktionszeit und die Liefertreue zu verbessern, ohne Kosten und Qualität zu vernachlässigen.⁵ Daraus ergibt sich die effiziente und wirtschaftliche Gestaltung von unternehmensinternen Prozessen als Handlungsfeld.⁶

Eine Produktion in kleinen Losen ist unumgänglich, wodurch hohe Bestände in den Prozessen entstehen und der Aufwand der zentralen Steuerung wächst.⁷ Hohe Bestände bedeuten wiederum lange Durchlaufzeiten und gebundenes Kapital. Deswegen ist die Reduktion der Bestände bei einer ökonomischen Anlagenauslastung anzustreben. Vor allem in der Prozessindustrie, einer anlagenintensiven Industrie, wird Anlagenauslastung hoch priorisiert. Das Spannungsfeld, welches sich durch das Streben nach kurzen Durchlaufzeiten, hoher Termintreue, niedrigen Beständen und hoher Anlagenauslastung ergibt, wird in der Literatur als Dilemma der

¹ Vgl. Schuh, G. et al. (2012), S. 3; Vgl. Westkämper, E. (2009), S. 11

² Vgl. Bundesvereinigung Logistik (BVL) (2008), S. 15

³ Vgl. Westkämper, E. (2009), S. 9

⁴ Vgl. Scholz-Reiter, B. et al. (2008), S. 110

⁵ Vgl. Ganschar, O. et al. (2013), S. 20

⁶ Vgl. Kerner, A. (2002), S. 1

⁷ Vgl. Ganschar, O. et al. (2013), S. 19

Ablaufplanung⁸ bezeichnet. Der Fokus auf der Verkürzung der Durchlaufzeit reicht nicht aus. Es muss der Konnex zwischen Anlage und Material bzw. Bestand berücksichtigt, untersucht und optimiert werden. Neben den logistischen, vorher genannten Zielen, dürfen die produktionswirtschaftlichen Ziele nicht vernachlässigt werden. So stehen das gebundene Kapital (widergespiegelt in Bestand und Durchlaufzeit) und die Fixkostendegression der Anlagen (Anlagenauslastung) in Konkurrenz. In Abbildung 1 ist die Ausgangssituation grafisch zusammengefasst.

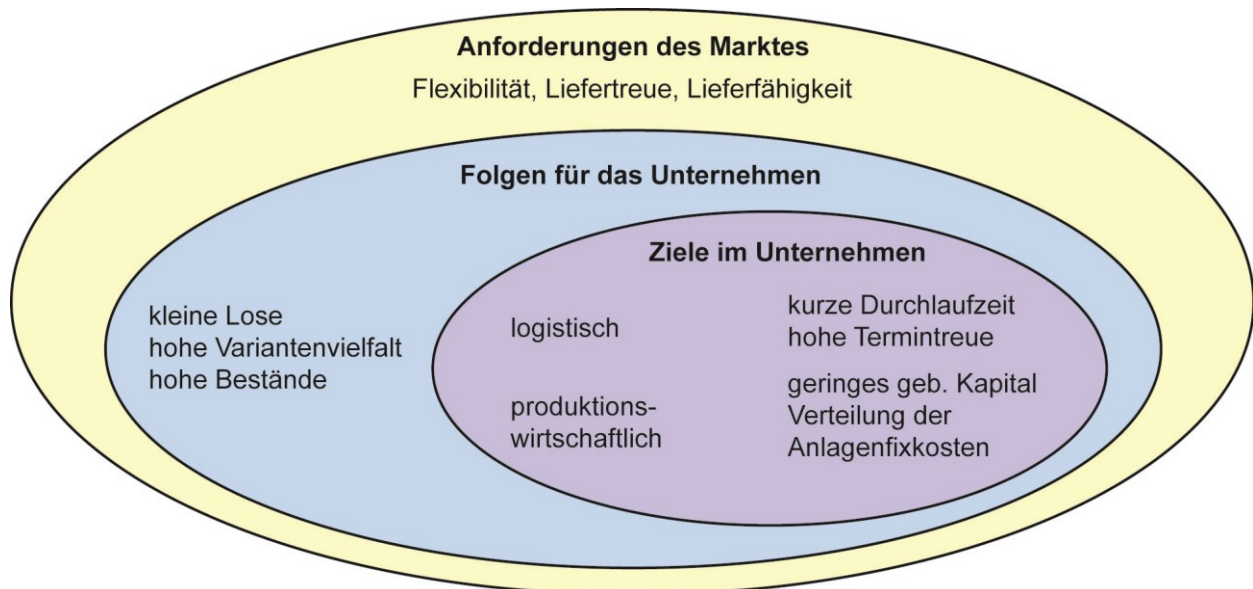


Abbildung 1: Ausgangssituation

Logistische Prozesse und fundamentale Zusammenhänge in der Produktion sind in der Praxis oft schwer nachvollziehbar. Deswegen ist der Bedarf an Modellen, welche die Realität von Fertigungsprozessen abbilden sehr hoch. Für die Beschreibung des Verhaltens von bestehenden, komplexen Systemen sind flexible und transparente Methoden notwendig und gefordert, welche mit angemessenem Aufwand anzuwenden sind.⁹

ASHBY hat angemerkt, dass Varietät nur mit Varietät zu begegnen ist.¹⁰ Dabei ist die Varietät das Maß für die Komplexität.¹¹ Das bedeutet in diesem Fall, dass komplexe Anforderungen in einer Produktion nur mit komplexen Systemen und Modellen begegnet werden können. Die innere Komplexität darf jedoch nicht zu hoch werden. Dies treibt die Komplexitätskosten in die Höhe und das Unternehmen wird ineffizient, was sich auf die Rendite negativ auswirken würde. Das bedeutet, die innere Komplexität muss auf die äußere Komplexität abgestimmt sein.¹²

Eine Herausforderung liegt bei der Generierung und Zusammenführung der Daten aus einzelnen Systemen in verschiedenen hierarchischen Ebenen. Beispielsweise müssen Daten aus dem Manufacturing Execution System (MES), dem Enterprise Resource Planning (ERP) System, der

⁸ Siehe Gutenberg, E. (1983)

⁹ Vgl. Schömig, A. et al. (2007), S. 465

¹⁰ Vgl. Ashby, W. R. (1957), S. 207

¹¹ Vgl. Fleisch, E. et al. (2005), S. 32

¹² Vgl. Bauernhansl, T. (2014), S. 14 f.

Betriebsdatenerfassung (BDE) u. a. zusammengeführt werden um eine zeitnahe Steuerung zu ermöglichen.

Die 4. Industrielle Revolution (Industrie 4.0), basierend auf Cyber Physical Systems (CPS), treibt das Thema der Datenaufnahme, -zusammenführung und -verarbeitung voran. Ausgelöst durch die wachsende Rechnerleistung, den Wert der Vernetzung und den notwendigen Drang zu Dezentralisierung und Autonomie aufgrund steigender Komplexität führt die Industrie 4.0 dazu, dass sämtliche Informationen in Echtzeit zur Verfügung stehen werden. Die Dienste der CPS und dem Internet der Dinge gemeinsam mit Menschen machen dies möglich.¹³ Die Entwicklungen in diesem Gebiet werden stetig vorangetrieben. Eine Studie des Fraunhofer Instituts hat ergeben, dass allerdings beispielsweise ERP-Systeme noch nicht reif für die Industrie 4.0 sind. SPATH meint, dass deterministische Planungs- und Steuerungssysteme nach wie vor Arbeitsgrundlagen sind, da sie nicht von heute auf morgen abgelöst werden können.¹⁴ Dies bedeutet, dass die komplexen Marktanforderungen mit bestehenden Systemen bewältigt werden müssen. Diese Situation birgt einige Herausforderungen in sich.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Unternehmen mit der Forderung nach Flexibilität, kundenspezifischen Produkten und kurzen Lieferzeiten seitens des Marktes konfrontiert werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, steigern sie ihre Produktvielfalt. Für die Produktion bedeutet dies hohe Bestände in den Prozessen, welche negativ auf kurze Durchlaufzeiten einwirken. Die Problematik liegt bei der Planung und Disposition. Es fehlen Modelle, die, zugeschnitten auf die Praxis, den Disponenten eine Hilfestellung geben die Höhe der Bestände richtig zu wählen, um eine ökonomische Auslastung der Anlagen zu erzielen und das gebundene Kapital in Form der Bestände gering zu halten. Zudem sollen diese Modelle mit Daten aus bestehenden Systemen erstellt werden können und Maßnahmen aus den Auswertungen abgeleitet werden.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

In der Literatur werden logistische Zielgrößen beschrieben, welche unterschiedlich eingesetzt werden, wie beispielsweise Durchlaufzeit-, Bestands-, Zuverlässigkeitskennzahlen, etc.¹⁵ Sie können zur Planung, Steuerung, Überwachung, Kontrolle, Analyse und zum Vergleich verwendet werden.¹⁶ Dazu werden Kennzahlen oder Kennzahlensysteme, wie zum Beispiel die Balanced Score Card, das Performance Prism oder das Tableau de Bord, welche in der Literatur als Performance Measurement Systeme bezeichnet werden, eingesetzt.¹⁷ In der Literatur wird auf die Zusammenhänge von Kennzahlen untereinander verwiesen. Sie beeinflussen sich gegenseitig. Diese Beeinflussungen und Abhängigkeiten müssen bei der Zielsetzung und Analyse berücksichtigt werden.¹⁸ Die Positionierung im gesamten logistischen Spannungsfeld kann mittels der

¹³ Vgl. Bauernhansl, T. (2014), S. 18

¹⁴ Vgl. Ganschar, O. et al. (2013), S. 104

¹⁵ Vgl. Wiendahl, H.-H. (2012), S. 107 ff.

¹⁶ Vgl. Syska, A. (1990), S. 26

¹⁷ siehe Gleich, R. (2011)

¹⁸ Vgl. Kleindienst, B. et al. (2015), S. 15

Betrachtung einzelner Kennzahlen nicht bewältigt werden. Dazu wird auf Kennzahlenmodelle verwiesen.¹⁹

Die Anforderungen an ein Modell, welches sich der Problematik in der Ausgangssituation annimmt, sind in Abbildung 2 zusammengefasst.

Kriterium	Ausprägungen			
Produktionsbereich	Beschaffung	Lager	Fertigung	Montage
Zielgrößen	Auslastung	Durchlaufzeit	Termintreue	Bestand
Phase	Entwurf		Betrieb	
Einsatzzweck	Beschreibung	Wirkung	Entscheidung	
Modellierungsgrundlage	empirisch		analytisch	
erforderliches Datenmaterial	umfangreich und spezifisch		geringe Menge an Standarddaten	
Systemgrenze	Einzelanlage		Anlagenverbund	

ungeeignete Merkmalsausprägung erforderliche Merkmalsausprägung

Abbildung 2: Morphologie des zu entwickelten Modells²⁰

Es ist ein Modell gefordert, welches im Fertigungsbereich im laufenden Betrieb eines Unternehmens angewendet werden kann. Einzelanlagen sollen anhand standardisierter Inputdaten im Hinblick auf Auslastung und Bestand analysiert werden können. Dabei liegt der Fokus auf der Darstellung der Wirkung der Zielgrößen aufeinander, mit einem analytischen Ansatz als Modellierungsgrundlage.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Analyse der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund in der Prozessindustrie, welches die erforderlichen Merkmalsausprägungen aus Abbildung 2 erfüllt. Dieses Modell soll Disponenten helfen, den optimalen Bestandsbereich zu identifizieren und zu erkennen, wo Optimierungspotenzial zur Erhöhung der Anlageneffektivität besteht. Dadurch können das gebundene Kapital gesenkt und der Effekt der Fixkostendegression bestmöglich ausgenutzt werden. Durch die Darstellung möglicher Veränderungen der Anlageneffektivität und dadurch verringerte optimale Bestandsbereiche werden die Produktionsplanung und die Planung von Optimierungsmaßnahmen erleichtert. Zusätzlich sollen weitere Analysemethoden entwickelt bzw. erarbeitet werden anhand deren Normstrategien und Maßnahmen abgeleitet werden können, die zu einer Verbesserung der Produktion führen.

¹⁹ Vgl. Lödding, H. (2004), S. 50 ff.; Vgl. Wiendahl, H.-H. (2011), S. 110 ff.

²⁰ Quelle: In Anlehnung an Beck, S. (2013), S. 28

Daraus ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

Wie ist ein Wirkmodell zur Analyse und Verbesserung der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund für die Prozessindustrie aufgebaut und welche Analysen, Methoden oder Modelle sind in weiterer Folge anzuwenden um Optimierungsmaßnahmen erarbeiten zu können?

Weitere Teilfragen können daraus abgeleitet werden:

- 1. Welche Besonderheiten sind in der Prozessindustrie gegeben?*
- 2. Welche Methoden, Modelle oder Kennzahlen eignen sich für die Zusammenstellung des Wirkmodells?*
- 3. Welche Analysen, Methoden oder Modelle sind in weiterer Folge anzuwenden um Optimierungsmaßnahmen erarbeiten zu können?*
- 4. Welche Optimierungen können durch den Einsatz des Wirkmodells erreicht werden?*

1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem in *Kapitel 1* an die Thematik der Arbeit herangeführt und der Aufbau dieser Arbeit beschrieben wird, erfolgt in *Kapitel 2* die Ausarbeitung der wissenschaftstheoretischen Grundlagen. In jenem Kapitel wird der entscheidungsorientierte Ansatz der Betriebswirtschaftslehre vorgestellt. Begründet nach HEINEN beschreibt er Einflüsse, welche auf Entscheidungen einwirken. Im Anschluss daran ist die Modellbildungstheorie erläutert. Es wird auf die Arten von Modellen eingegangen. Einige davon finden sich in der entwickelten Analysepyramide wieder. Die Systemtheorie und die Komplexitätstheorie vervollständigen das Kapitel. Die Systemtheorie gibt Aufschluss über die Zusammensetzung von Systemen und das Systemdenken, welches für die Entwicklung des Modells wichtig ist. Die Komplexitätstheorie beschreibt die Dimensionen der Komplexität, welche für das Modell ausschlaggebend sind und es begründen.

Das *dritte Kapitel* ist den Grundlagen der Produktionswirtschaft gewidmet, in jenem für die Arbeit wichtige Begriffe definiert und beschrieben sind um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Des Weiteren wird auf die Eigenheiten der Prozessindustrie eingegangen, da sich die Aufgabenstellung der Dissertation auf diese Branche bezieht. Im Abschnitt „Methoden für das operative Management“ sind Methoden angeführt, welche zu einer Optimierung der Produktion führen können. Hier wird im Speziellen auf die Gesamtanlageneffektivität eingegangen. Auftrags-, Durchführungs- und Durchlaufzeit bilden die Grundlage für das Trichtermodell und Durchlaufdiagramm, welche die Basis für die Produktionskennlinien darstellen.

In *Kapitel 4* wird auf die Produktionskennlinie eingegangen. Es wird beschrieben, wie sich jene berechnet und an reale Gegebenheiten anpassen lässt und ob sie sich im Vergleich mit der Simulation und der Warteschlangentheorie durchsetzt.

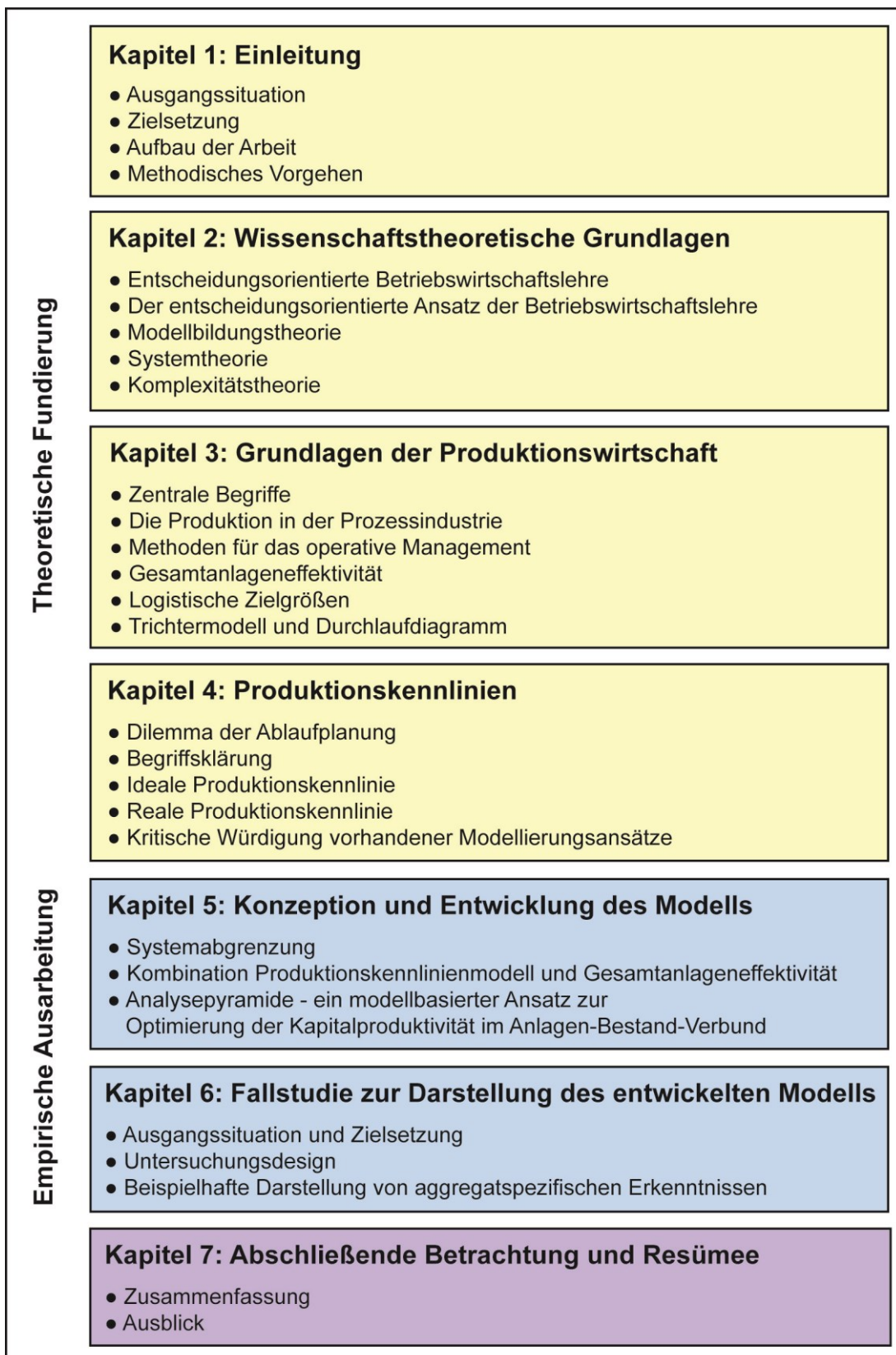


Abbildung 3: Struktureller Aufbau der Dissertation

Das Konzept und die Entwicklung des geforderten Modells sind Inhalt des *fünften Kapitels* und der Kern dieser Arbeit. In welchen Systemgrenzen dieses Modell gültig und wie es aufgebaut ist, wird in diesem Kapitel vorgestellt. Nachfolgend wird erläutert, wie sich das Modell in die Analysepyramide eingliedert und wie weitere Analysen aussehen können.

In *Kapitel 6* wird das Modell anhand einer realen Problemstellung in der Prozessindustrie exemplarisch dargestellt. Dabei handelt es sich um ein Walzwerk, in welchem die Problematik von hohen Beständen im Prozess und teilweise niedriger Anlageneffektivität besteht.

Das *siebente Kapitel* bildet den Abschluss dieser Dissertation. Es schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

In Abbildung 3 ist der Aufbau grafisch dargestellt.

1.4 Methodische Vorgehensweise

Forschung kann in zwei Arten unterteilt werden: Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung. Sie unterscheiden sich im Allgemeinen durch die Anwendbarkeit der Ergebnisse, die Begründung der Relevanz und der Rechtfertigung der Forschungsergebnisse. Im Folgenden sind die unterschiedlichen Ausprägungen angeführt:²¹

- In der *Grundlagenforschung* liegt der Fokus auf allgemeingültigem Wissen. Sie ist auf allgemeine Beschreibungen und Erklärung von Sachverhalten und Zusammenhängen ausgerichtet, wobei es nicht um einen einzelnen Fall geht, sondern um generelle Tendenzen. Des Weiteren wird die Themenwahl bzw. dessen Relevanz wissenschaftsimmanent aus identifizierten Lücken im aktuellen Wissensstand bzw. aus Widersprüchen begründet. Die Sicherung der Gültigkeit der Ergebnisse ist die Grundlage aller Entscheidungen in der Grundlagenforschung. Die Aussagen der Untersuchungen müssen in den festgelegten und eindeutig formulierten Randbedingungen präzise sein. Ziel der Grundlagenforschung ist der kritische Diskurs mit dem Fachkollegium und die Behauptung in demselben. Durch den Nachweis, dass alle wissenschaftlichen Standards eingehalten wurden, wird das Vorgehen gerechtfertigt. So sollen eventuelle Schwächen des Ansatzes oder Fehlschlüsse aufgedeckt werden. Die möglichst aktuelle Publikation der Ergebnisse, um jene der Science Community zugänglich zu machen, steht im allgemeinen Interesse.
- Die *anwendungsorientierte Forschung* liefert Ergebnisse, die in der Praxis verwendet werden können. Dabei spielt die Anwendbarkeit der Befunde in dem speziellen Fall eine zentrale Rolle und nicht die abstrakten Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten. Die zu behandelten Fragestellungen werden von der Praxis aufgeworfen. Deswegen liegt der Fokus nicht auf der exakten wissenschaftlichen Durchführung von Forschungsprojekten und präzisen, allgemeingültigen Aussagen, sondern auf der Anwendungspraxis. Die Resultate müssen nicht primär vor der Science Community sondern vor den Praktikern gerechtfertigt werden. Die Praxisrelevanz und unmittelbare Brauchbarkeit stehen im Vordergrund.

²¹ Vgl. Kromrey, H. (2002), S. 19 f.

Die vorliegende Arbeit kann in der anwendungsorientierten Forschung eingegliedert werden. Sie dient dazu, einen Beitrag zu leisten, um in der logistikbezogenen Praxis die Problematik von hohen Beständen im Prozess und ökonomischer Anlagenauslastung lösen zu können.

Das forschungsmethodische Vorgehen ist deduktiv-explorativ. Die deduktive Methode schließt vom Allgemeinen auf das Besondere.²² In dieser Arbeit umfassen die ersten Kapitel eine systematische Analyse der Literatur im Zuge der deduktiven Ableitung der Anforderungen an das zu entwickelnde Modell aus der Prozessindustrie, sowie die Einsetzbarkeit von Produktionskennlinien. Das Vorgehen zur Erarbeitung der anderen Kapitel ist als explorativ zu bezeichnen. Es werden keine quantitativen Analysen und statistischen Auswertungen in Form von Fragebögen durchgeführt, welche eine Darstellung von Null- und Alternativhypothesen zulassen. Die Überprüfung erfolgt auf analytischem Weg durch die Durchführung eines Fallbeispiels.²³ Dabei wurde nach dem Ansatz der Aktionsforschung (Action-Research-Ansatz) vorgegangen. In diesem Ansatz werden Probleme gemeinsam mit Beteiligten erhoben, sowie die Veränderungsmaßnahmen eingeleitet, durchgeführt und deren Wirksamkeit analysiert. Dabei sind die Grenzen zwischen Forscher und Auftraggeber sowie Forschung und Veränderung fast nicht erkennbar. Somit wird die klassische Trennung zwischen Objekt und Subjekt der Forschung aufgehoben.²⁴

Die Daten und Informationen für das Einzelfallbeispiel wurden durch teilnehmende Beobachtungen, Interviews, Gruppendiskussionen und Dokumentenanalysen gewonnen.

- *Teilnehmende Beobachtung*: Als teilnehmende Beobachter ist man in die zu beobachtende Situation vollständig integriert. Dabei werden das Geschehen und das Verhalten systematisch erfasst, festgehalten und gedeutet. Bei einer aktiv teilnehmenden Beobachtung kann die fehlende Objektivität als Nachteil genannt werden, die durch den Vorteil sich in die Rolle der beobachteten Person einfühlen zu können und Hintergründe zu verstehen, relativiert wird.²⁵ Im Fallbeispiel wurde dadurch erhoben, wie die Produktion abläuft, welche Herausforderungen bestehen und welche Anforderungen an das Modell von Seitens der Praxis bestehen.
- *Interviews und Gruppendiskussionen*: Die Interviews unterstützen die Erfassung der Ausgangssituation und die Evaluierung der Ergebnisse. Die Befragungen beim Projektpartner wurden meist unstrukturiert durchgeführt. Dies bedeutet, dass kein Fragebogen zur Grundlage dient und der Befragte den Verlauf des Gespräches mitbestimmen kann.²⁶ In den Gruppendiskussionen wurden Fortschritte und Anwendungen besprochen. Dabei waren Mitarbeiter aus verschiedenen hierarchischen Ebenen und Abteilungen beteiligt.
- *Dokumentenanalyse*: Um zu wissen, welche Modelle, Methoden, Auswertungen etc. beim Projektpartner bereits angewendet wurden, wurden zahlreiche Dokumente gesichtet und analysiert.

²² Vgl. Chalmers, A. F. (2007), S. 35 ff.

²³ Vgl. Schneeberger, T. (2006), S. 20

²⁴ Vgl. Staehle, W. (1991), S. 848

²⁵ Vgl. Atteslander, P. et al. (2008), S. 67 ff.

²⁶ Vgl. Schnell, R. (1995), S. 300

2 Wissenschaftstheoretische Grundlagen

„Wer hohe Türme bauen will, muss lange beim Fundament verweilen.“

Anton Bruckner (1824-1896), österreichischer Komponist

Im ersten Kapitel werden die wissenschaftstheoretischen Grundlagen aufgearbeitet, unter jene die entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre, System-, Modellbildungs- und Komplexitätstheorie fallen. Der Forschungsbedarf kommt aus der Praxis und bei der Ausarbeitung der Lösung wird der Action-Research-Ansatz verfolgt, wie in Abschnitt 1.4 erläutert. Die Ergebnisse sollen wiederum in der Praxis angewendet werden. Deswegen wird zu Beginn auf die entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre eingegangen. Im Laufe dieser Arbeit soll ein Wirkmodell erstellt werden. Wo dieses in der Modelltheorie einzugliedern ist und wie der Prozess der Modellbildung aussieht wird im nächsten Abschnitt geklärt. Da sich die Systemgrenzen im Zuge der Ausarbeitung der Lösung der Forschungsfrage erweitern und der Systemgedanke eine wichtige Rolle spielt, wurde die Systemtheorie in dieses Kapitel aufgenommen. Zum Schluss folgt die Erläuterung der Komplexitätstheorie, um ein einheitliches Verständnis über den Begriff der Komplexität zu schaffen, da diese einen zentralen Punkt in der Ausgangssituation darstellt.

2.1 Entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre

Grundsätzlich gibt es zwei Wege um Entscheidungen zu fällen – präskriptiv und deskriptiv. Bei der präskriptiven oder normativen Entscheidungstheorie wird dem Entscheidungsträger vorgegeben, wie er sich zu verhalten hat.²⁷ Das rationale Denken und Handeln steht im Vordergrund, das Rationalverhalten wird analysiert und erklärt.²⁸ Diese Theorie befasst sich mit der Frage: „Wie soll sich der Mensch entscheiden um die bestimmten Ziele bestmöglich zu erreichen?“²⁹ Dem gegenüber steht die deskriptive Entscheidungstheorie. Hierbei geht es um die Erklärung und Ermittlung des tatsächlichen Entscheidungsverhaltens.³⁰ Durch Empirie sollen Hypothesen über zukünftiges Handeln aufgestellt und die Prognose über das Entscheidungsverhalten in zukünftigen Entscheidungssituationen ermöglicht werden.³¹ Hier steht die Frage: „Wie sieht die Entscheidungsfindung in der Realität aus und warum werden Entscheidungen so gefällt und nicht anders?“ im Fokus.³²

²⁷ Vgl. Meyer, R. (1999), S. 2

²⁸ Vgl. Engel, F. (1981), S. 13

²⁹ Vgl. Heinen, E. (1969) S. 209 zitiert nach Rommelfanger, H.; Eickemeier, S. (2002), S. 2

³⁰ Vgl. Engel, F. (1981), S. 2

³¹ Vgl. Meyer, R. (1999), S. 2

³² Vgl. Rommelfanger, H.; Eickemeier, S. (2002), S. 3

Präskriptive Entscheidungstheorie

In der präskriptiven Entscheidungstheorie wird der Faktor Mensch ausgeklammert. Es wird davon ausgegangen, dass die entscheidende Person ein rational denkendes und handelndes Individuum ist, egal ob es eine Einzelperson, eine Gruppe oder eine juristische Person ist. Dieses Individuum ist ein Homo Oeconomicus, der endlose Rechenkapazität und logische Fähigkeiten besitzt.³³ Das Grundmodell dieser Theorie besteht aus dem Entscheidungsfeld und den zu erreichenden Zielen des Entscheidungsträgers.

Handlungsalternativen werden nach dem Kriterium bewertet, in welchem Maße sie die Zielerreichung erfüllen.³⁴ Des Weiteren ist für die Wahl einer Alternative essentiell, welche Entscheidungsaktionen zur Verfügung stehen und welche Umweltsituationen auf den Erfolg der Entscheidung Einfluss nehmen. Die Beschaffung der richtigen Daten darf nicht vernachlässigt werden. Die größte Herausforderung dabei ist die Ermittlung der Erfolge der unterschiedlichen Handlungsalternativen unter verschiedenen Umweltkonstellationen.³⁵ In folgender Abbildung ist das Begriffssystem der normativen Entscheidungstheorie dargestellt.

Deskriptive Entscheidungstheorie

Der größte Unterschied zur präskriptiven Entscheidungstheorie ist das Miteinbeziehen der Realität. Die deskriptive Entscheidungstheorie befasst sich mit dem tatsächlichen, intuitiven Entscheidungsverhalten des Menschen.³⁶ Wie die Entscheidungen mit den existierenden Entscheidungssituationen zusammenhängen, wird durch empirische Beobachtungen identifiziert.³⁷

Bei dieser Theorie wird zuerst versucht das Entscheidungsverhalten von Einzelpersonen abzubilden. Die Hauptteile des Entscheidungsprozesses sind dabei die Willensbildung und die Willensdurchsetzung. Danach versucht man den mehrpersonalen Entscheidungsprozess zu erklären.³⁸ In der Realität werden Entscheidungen meist von Gruppen oder Organisationen getroffen, was nach der deskriptiven Entscheidungstheorie einen Unterschied bei den Entscheidungen macht.

2.2 Der entscheidungsorientierte Ansatz der Betriebswirtschaftslehre

HEINEN begründete in den 1960er den Ansatz der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre. Damit verband er die Betriebswirtschaftslehre mit Nachbarwissenschaften und überschritt die Grenzen der traditionellen Betriebswirtschaftslehre. In diesem Ansatz geht es darum, nicht nur die ökonomischen Ziele wie Gewinn-, Umsatz- und Wirtschaftlichkeitsstreben zu verfolgen, sondern auch um Macht oder Prestige. Wie die Entscheidungen getroffen werden liegt im Fokus dieses Ansatzes, sowie die Prozesse der Willensbildung und Willensdurchsetzung, somit ist er in der deskriptiven Entscheidungstheorie einzuordnen. Die interdisziplinäre Aufgeschlossenheit

³³ Vgl. Menges, G. (1974), S. 87

³⁴ Vgl. Engel, F. (1981), S. 19 f.

³⁵ Vgl. Engel, F. (1981), S. 20 f.

³⁶ Vgl. Eisenführ, F.; Weber, M. (2003), S. 358

³⁷ Vgl. Rommelfanger, H.; Eickemeier, S. (2002), S. 3

³⁸ Vgl. Heinen, E. (1991), S. 35

ist ein wesentliches Merkmal.³⁹ „Die entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre versucht (...) auf der Basis einer deskriptiven Theorie des menschlichen Entscheidungsverhaltens, den Ablauf von Entscheidungsprozessen in Unternehmungen zu erklären und Verhaltensempfehlungen für die Entscheidungsträger zu geben.“⁴⁰ Es geht um das Erkennen eines Problems, die Suche und Auswahl von Alternativen, deren Durchsetzung und Kontrolle.⁴¹

Inhalte des Konzepts

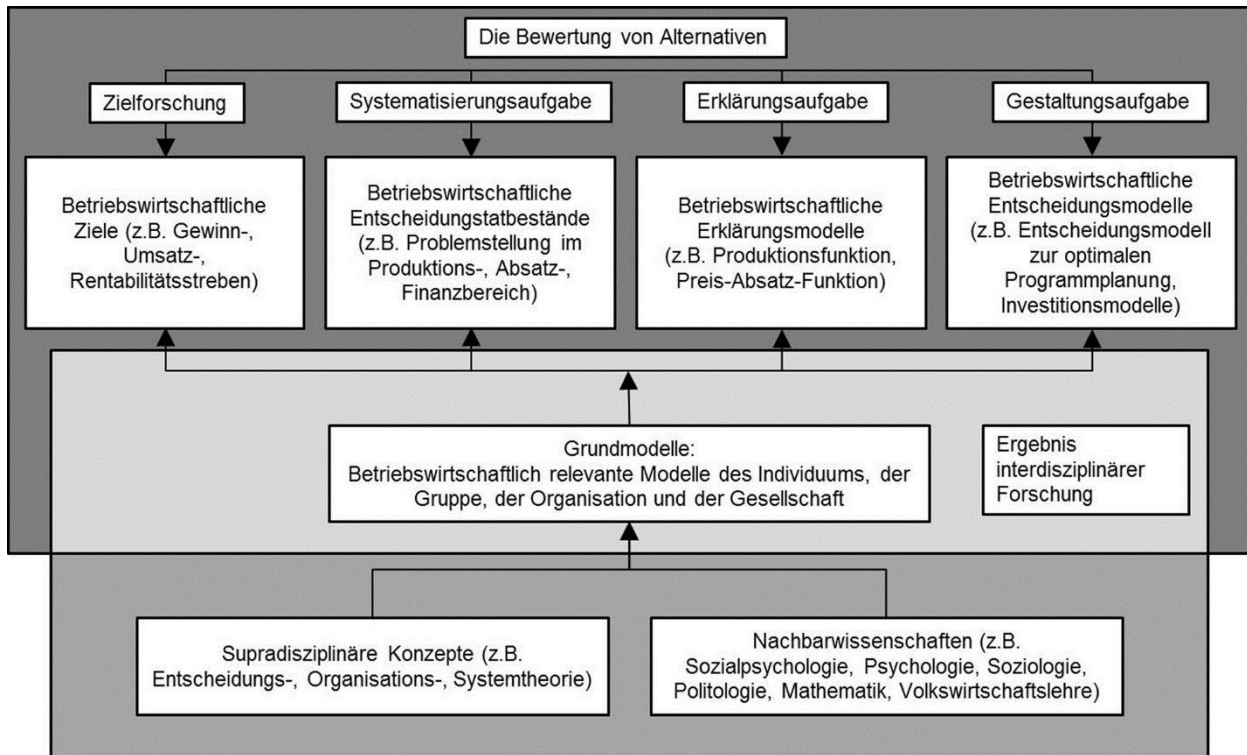


Abbildung 4: Konzept der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre⁴²

Abbildung 4 zeigt die Bausteine des entscheidungsorientierten Ansatzes. Das obere große Rechteck umschließt die traditionelle Betriebswirtschaftslehre und das untere große Rechteck stellt die Verbindung zu den Nachbarwissenschaften dar.⁴³

Zielforschung

Um eine Alternative bewerten zu können müssen betriebswirtschaftliche Ziele definiert werden, welche die angestrebten Zustände beschreiben. Es werden grundsätzlich mehrere Ziele verfolgt - das Zielsystem der Unternehmung.⁴⁴ „Die Analyse und Präzisierung des Ziels stellen einen zentralen Problemkreis der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre dar.“⁴⁵

³⁹ Vgl. Heinen, E. (1971), S. 430; Thommen, J.-P., <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8006/entscheidungsorientierte-betriebswirtschaftslehre-v6.html> (Zugriff: 17.06.2014)

⁴⁰ Heinen, E. (1971), S. 430

⁴¹ Vgl. Heinen, E. (1978), S. 25

⁴² Quelle: In Anlehnung an Heinen, E. (1978), S. 30

⁴³ Vgl. Heinen, E. (1971), S. 430

⁴⁴ Vgl. Heinen, E. (1971), S. 430 f.

⁴⁵ Heinen, E. (1971), S. 431

Die Zielforschung soll als Basis über die Ziele in der Praxis informieren, mögliche alternative Ziele entwickeln, die Prozesse der Zielentstehung beschreiben und die Beziehungen zwischen den Zielen beleuchten.⁴⁶

Systematisierungsaufgabe

Die Systematisierungsaufgabe ist eine Hilfsfunktion und für den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn erforderlich. Durch die Erfassung des umfangreichen Objektbereichs und der Gliederung in Kriterien wird das Erkennen und Abgrenzen von Problemen erleichtert.⁴⁷ Das Ergebnis dieser Aufgabe ist ein Beschreibungsmodell.⁴⁸

Erklärungsaufgabe

Dabei werden reale wirtschaftliche Zusammenhänge erklärt und die komplexe Realität vereinfacht abgebildet. Diese Theorien oder Aussagesysteme werden für Teilbereiche der betrieblichen Wirklichkeit formuliert und vereinfacht dargestellt. Aus diesem Grund werden sie als Erklärungsmodelle bezeichnet. Aufgrund der Erklärungen können Prognosen abgegeben werden. Erklärung und Prognose sind aneinander gekoppelt – das eine geht ohne das andere nicht.⁴⁹

Gestaltungsaufgabe

Die Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen inkludiert die Annahme über die Zielvorstellungen der Adressaten, Erklärungsmodelle und Lösungsalgorithmen. Aus diesen drei Punkten entstehen Entscheidungsmodelle, die dem Entscheidungsträger die Ableitung seiner Entscheidung ermöglichen⁵⁰ bzw. zu optimalen oder befriedigenden Lösungen führen.⁵¹ Grundsätzlich können Entscheidungsmodelle auf der normativen (präskriptiv) oder der empirisch-realistischen (deskriptiven) Entscheidungstheorie basieren.

Grundmodelle

Beim entscheidungsorientierten Ansatz wird ein stärkerer Realitätsbezug angestrebt, ausgehend von der Annahme, dass der Mensch versucht rational zu handeln, jedoch durch die unsichere Zukunft, psychologische, physiologische und machtbefindliche Faktoren beeinflusst wird.⁵² Die Grundmodelle werden auf den Ebenen Individuum, Gruppe, Organisation und Gesellschaft gebildet und zeigen und erklären die Verhaltensweisen der Entscheidungsträger. Sie vereinen die Betriebswirtschaftslehre mit anderen Wissenschaften, womit Erkenntnisse der Nachbarwissenschaften brauchbar gemacht werden.⁵³

Im entscheidungsorientierten Ansatz wird das Grundmodell Betriebswirtschaft als Organisation gesehen. Die wesentlichen Strukturmerkmale dieser Organisation sind die Arbeitsteilung, die

⁴⁶ Vgl. Hopfenbeck, W. (1997), S. 45

⁴⁷ Vgl. Heinen, E. (1978), S. 28

⁴⁸ Vgl. Hopfenbeck, W. (1997), S. 46

⁴⁹ Vgl. Heinen, E. (1978), S. 28 ff.; Thommen, J.-P., <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8006/entscheidungsorientierte-betriebswirtschaftslehre-v6.html> (Zugriff: 17.06.2014)

⁵⁰ Vgl. Heinen, E. (1978), S. 30

⁵¹ Vgl. Heinen, E. (1969), S. 210

⁵² Vgl. Heinen, E. (1971), S. 433

⁵³ Vgl. Heinen, E. (1978), S. 32

Machtbeziehungen und die Kommunikationskanäle, wobei wichtige Prozesse die Informations-, Geld- und Gütertransformationsprozesse sind. Die Kommunikations- und Machtbeziehungen zwischen den Mitglieder oder der Organisation und den Subsystemen, also der Umwelt, sind für die Zielbildung innerhalb der Organisation von Bedeutung. So wird der entscheidungsorientierte Ansatz als Koalition von Interessensgruppen bzw. als politisches System angesehen. Welche Zielsetzungen zu Entscheidungskriterien einer Organisation werden, ist stark von der Besetzung der Machtpositionen abhängig.⁵⁴

Da der Forschungsansatz dieser Arbeit deduktiv-explorativ ist, d.h. Ansätze aus der Literatur, wie dieser, zur Basis dienen, die Aufgabenstellung aber aus der Praxis kommt, soll auch das zu entwickelnde Modell in der Praxis Anwendung finden. Hierzu wird der entscheidungsorientierte Ansatz berücksichtigt. Bei der Erarbeitung und der Entwicklung des Modells wurde eng mit den Mitarbeitern des Unternehmens, in dem das Fallbeispiel (siehe Kapitel 6) durchgeführt wurde, zusammengearbeitet.

2.3 Modellbildungstheorie

Seit langem werden wissenschaftliche Erkenntnisse durch Modelle abgebildet. Der Unternehmungsprozess wird durch ein Aussagesystem ausgedrückt, um die Erkenntnisse zu gewinnen, zu formulieren und zu überprüfen. An diesen Systemen können analytische und synthetische Operationen vorgenommen werden, um Implikationen freizulegen.⁵⁵

SCHWEITZER definiert den Modellbegriff wie folgt: „Ein **Modell** ist die strukturgleiche (isomorphe) bzw. strukturähnliche (homomorphe) Abbildung eines Teilzusammenhangs aus einem (realen) Betrachtungsgegenstand.“⁵⁶

Eine einfachere Definition geben DOMSCHKE und SCHOLL „Ein **Modell** ist ein (vereinfachtes) Abbild eines realen Systems oder Problems (=Urbild).“⁵⁷

Genauso wie in den Ansätzen der Systemtheorie und der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre wird hier das Wissen aus verschiedenen Fachdisziplinen zusammengefügt.⁵⁸ STACKOWIAK hat drei Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs herausgearbeitet, die in Abbildung 5 dargestellt sind.

⁵⁴ Vgl. Heinen, E. (1971), S. 434 f.

⁵⁵ Vgl. Schweitzer, M. (1994), S. 52

⁵⁶ Schweitzer, M. (1994), S. 52

⁵⁷ Domschke, W.; Schöll, A. (2000), S. 27

⁵⁸ Vgl. Töllner, A. et al. (2010), S. 8

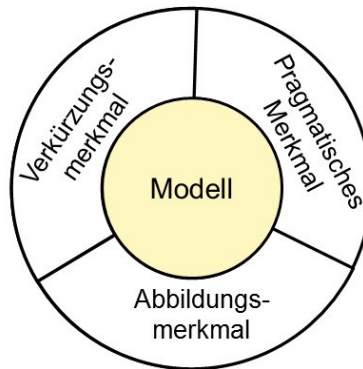


Abbildung 5: Allgemeine Merkmale von Modellen⁵⁹

Modelle bilden reale Systeme bzw. natürliche oder künstliche Originale ab bzw. repräsentieren diese (Abbildungsmerkmal). Durch die Modelle werden nicht alle Attribute des Originals gezeigt, sondern jene, die für den Ersteller relevant sind (Verkürzungsmerkmal). Zwischen Modellen und Originalen besteht eine zweckgebundene Verbindung, die für ein bestimmtes Zeitintervall gültig ist. Sie beschränken sich auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen (pragmatisches Merkmal).⁶⁰

2.3.1 Modellarten

Anhand ihrer Zielsetzung kann eine Klassifikation der Modelle vorgenommen werden, welche in Tabelle 1 aufgelistet ist.

Tabelle 1: Klassifikation der Modelle anhand ihrer Zielsetzung⁶¹

Zielsetzung	Bezeichnung	Merkmale
Geordnete Beschreibung von Elementen und ihren Beziehungen in realen Systemen	Deskriptive Modelle: Ermittlungsmodelle, Erfassungsmodelle, Beschreibungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Enthalten keine Hypothese • Transformieren Daten in verständlicher Form • Verwenden Definitionsgleichungen, die auf einfachen arithmetischen Operationen beruhen
Beitrag zum Verstehen eines Problems	Erklärungsmodelle, Kausalmodelle, Wirkmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Formulieren Aussagen über Gesetzmäßigkeiten in realen Systemen • Beanspruchen empirische Geltung der gemachten Aussagen
	Prognosemodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamische Modelle • Prognostizieren zukünftige Entwicklungen
Beitrag zum Lösen eines Problems	Entscheidungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Bewerten Handlungsalternativen • Ermitteln Handlungsalternativen

⁵⁹ Quelle: In Anlehnung an Töllner, A. et al. (2010), S. 9

⁶⁰ Vgl. Töllner, A. et al. (2010), S. 8 f.

⁶¹ Quelle: In Anlehnung an Homburg, C. (1998), S. 34

Deskriptive Modelle oder Beschreibungsmodelle

Sie stellen die Elemente und ihre Beziehungen dar, beinhalten aber keine Hypothese über reale Wirkzusammenhänge. Deswegen können sie nicht zur Prognose realer Vorgänge herangezogen werden.⁶² Beispiele dafür sind das Prozesskettenmodell nach Kuhn, die Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS) und das Trichtermodell nach BECHTE.⁶³ Auf letzteres wird in Abschnitt 3.7 genauer eingegangen.

Das ARIS-Prozessmodell ist eine Architektur um Geschäftsmodelle zu beschreiben.⁶⁴ Es unterscheidet verschiedene Beschreibungsschichten und -ebenen. Die Beschreibungssichtweisen – Datensicht, Steuerungssicht, Funktionssicht, Organisationssicht und Leistungssicht – erfassen unterschiedliche inhaltliche Aspekte von Unternehmen. Die Beschreibungsebenen (Fachkonzept, DV-Konzept, Implementierung) sind an die Phasen des Software-Engineering angelehnt und stellen die unterschiedliche Nähe der Informationstechnik zum Beschreibungsgegenstand einer Ebene dar.⁶⁵

Das Prozesskettenmodell beschreibt anhand von chronologisch angeordneten Prozesskettenelementen logistische Systeme. Durch die drei Kernelemente (1) Produzieren/Prüfen, (2) Transportieren und (3) Lagern kann eine logistische Prozesskette vollständig definiert werden. Das Prozesselement beschreibt die Transformation von einem gegebenen Input in einen definierten Output. Dabei eingesetzte Ressourcen ändern die Attribute des Prozesskettenelements, die als Leistungsobjekte bezeichnet werden. Die Zusammenfügung von Elementen zu Prozessketten lässt eine Beschreibung logistischer Prozesse auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen zu.⁶⁶

Erklärungs-, Kausal-, Wirk- und Prognosemodelle

Erklärungs-, Kausal- oder Wirkmodelle bilden die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ab bzw. untersuchen diese und davon abhängige Variablen. Damit kann das Systemverhalten erklärt und Hypothesen aufgestellt werden. Mittels Prognosemodellen werden zukünftige Daten hervorgegagt und das Abschätzen von Auswirkungen der Handlungsmöglichkeiten getätigt.⁶⁷

Erklärungsmodelle können in deduktive und experimentelle Modelle getrennt werden. Deduktiv bedeutet, dass aus dem Allgemeinen das Besondere abgeleitet wird. Dabei wird von einer qualitativen Vorstellung, wie Einflussgrößen wirken, ausgegangen. Durch Isolation einzelner Zusammenhänge und Abstraktion der spezifischen Systemkennzeichen werden diese vereinfacht und auf das Wesentliche des Originalsystems reduziert. So werden aus elementaren Gesetzmäßigkeiten mathematische Beschreibungen.⁶⁸ Der Vorteil von deduktiven Modellen ist

⁶² Vgl. Domschke, W.; Scholl, A. (2000), S. 28

⁶³ Vgl. Nachtwey, A. (2010), S. 26

⁶⁴ Vgl. Scheer, A.-W. (2000), S. 1

⁶⁵ Vgl. Fettke, P., <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/datenwissen/Informationsmanagement/Business-Engineering/-Business-Engineering--Ansatz-des/Architektur-integrierter-Informationssysteme-/index.html?searchterm=aris> (Zugriff: 29.04.2015)

⁶⁶ Vgl. Kuhn, A.; Hellgrath, B. (2006), S. 300 ff.; Kerner, A. (2002), S. 11

⁶⁷ Vgl. Domschke, W.; Scholl, A. (2000), S. 29

⁶⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 39 f.

unter anderem, dass sie auf viele andere analoge Problemstellungen übertragen werden können.⁶⁹ NYHUIS und WIENDAHL nennen das Warteschlangenmodell als Beispiel eines klassischen deduktiven Modells.⁷⁰

Die Warteschlangentheorie ist mittlerweile ein Teilgebiet des Operations Research. Ihre Anfänge liegen noch vor dem Beginn dessen und sind in vielen Formen auf unterschiedlichsten Gebieten zu finden.⁷¹ Ein Warteschlangenmodell beschreibt mit Hilfe von statistischen Verteilungen und mathematischen Modellen das Ankunftsverhalten von Aufträgen und das Abarbeitungsverhalten von Bedienungszentren.⁷² Ein Großteil der Warteschlangenmodelle ist auf das Gesetz von LITTLE zurück zu führen. Es besagt, dass die Anzahl der sich im System befindlichen Aufträge gleich dem Produkt von durchschnittlicher Ankunftsrate und Verweildauer ist.⁷³ Ausgehend von dem Grundmodell (siehe Abbildung 6), welches verschieden variiert werden kann, können komplexe Warteschlangennetze beschrieben und berechnet werden.⁷⁴ In der Produktionsplanung werden diese Modelle beispielsweise in der Lagerhaltung, bei der Werkzeug- und Ersatzteilausgabe, Wartung von Maschinen oder in der Ablaufplanung angewendet.⁷⁵ Bei letzterem liegt der Fokus auf der Dimensionierung von Engpässen, wobei die Wirkungszusammenhänge zwischen logistischen Größen beschrieben werden.⁷⁶

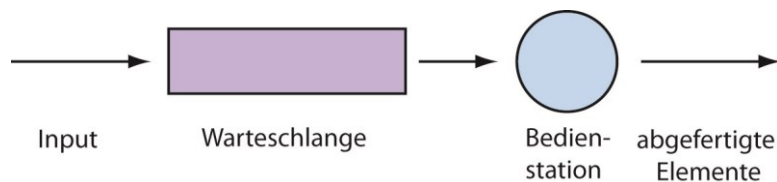


Abbildung 6: Warteschlangenmodell⁷⁷

Nähere Ausführungen zu den Warteschlangenmodellen werden in Abschnitt 4.5.1 gegeben.

Als Beispiel für ein experimentelles Modell kann die Simulation genannt werden. Im Allgemeinen inkludiert der Begriff „Simulation“, Künstlichkeit und Vortäuschung. Reale Sachverhalte werden künstlich vorgetäuscht, wobei nicht nur die reale Struktur, sondern vor allem das Verhalten der Wirklichkeit nachgeahmt wird.⁷⁸ Durch das Experimentieren mit Modellen und die Entwicklung derselben kann das Verhalten analysiert und bewertet werden.⁷⁹ Die experimentelle Modellbildung hat ein breites Anwendungsfeld. In der Produktionswirtschaft erstreckt sich ihr Einsatzgebiet von der Planung bis zum Betrieb oder von der Produktentwicklung bis zur Anlagenplanung.⁸⁰ Mittels der Simulationstechnik können beispielsweise Logistik- und Materialflüsse abgebildet und mittels veränderbarer Parameter Auswirkungen bewertet werden, wie zahlreiche

⁶⁹ Vgl. Möller, D. P. F. (1992), S. 93

⁷⁰ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 41

⁷¹ Vgl. Zimmermann, H.-J. (1992), S. 229 f.

⁷² Vgl. Kerner, A. (2002), S. 16

⁷³ Vgl. Little, J. D. C. (1961), S. 383

⁷⁴ Vgl. Nachtwey, A. (2010), S. 29; Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 41

⁷⁵ Vgl. Kistner, K.-P. (1987), S. 285

⁷⁶ Vgl. Nachtwey, A. (2010), S. 29

⁷⁷ Quelle: In Anlehnung an Zimmermann, H.-J. (1992), S. 230

⁷⁸ Vgl. Runzheimer, B. (1999), S. 246

⁷⁹ Vgl. Frank, M. (1999), S. 50

⁸⁰ Vgl. Hirschberg, A. (1998), S. 7

Anwendungsfälle zeigen.⁸¹ Allerdings sind die Erstellung, die Validierung und das Testen eines mittels Simulation erstellten Modells sehr aufwändig und zeitintensiv, da die Ergebnisse speziell und nicht allgemein gültig sind. Somit ist für jeden Anwendungsfall ein neues Modell aufzubauen.⁸² Des Weiteren liegt der Fokus einer Simulation auf der Abbildung von Zuständen, nicht auf dessen Verbesserungen. Es werden keine logistischen Optimierungspotenziale angezeigt oder mögliche Grenzwerte, die das System erreichen kann, angegeben.⁸³ Dieses Defizit kann durch ein Zusammenführen von Simulation und Monitoringsystemen geschwächt werden.⁸⁴

In der Produktionskennlinie nach NYHUIS und WIENDAHL werden beide Ansätze kombiniert. Sie ist ein deduktiv-experimentelles und statisches Erklärungsmodell, welches die Wechselwirkungen zwischen logistischen Zielgrößen in einem Produktionssystem abbildet.⁸⁵ Dabei ist die zugrundeliegende allgemein interpretierbare Modellstruktur deduktiv und die Anpassung der Parameter an die realen Gegebenheiten der experimentelle Anteil.⁸⁶ Dieses Thema wird in Abschnitt 4.5 fortgesetzt und vertieft.

Entscheidungsmodelle

Bei den Entscheidungsmodellen werden die erklärenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch Zielrelationen zur Bewertung und Auswahl der Handlungsalternativen erweitert. Sie bilden ein Entscheidungsproblem ab und ermöglichen die Auswahl der, in Bezug auf die Ziele, günstigsten Lösung.⁸⁷ Dabei kann es sich auf der strategischen Ebene um die Wahl des geeignetsten Standorts oder die Layoutplanung handeln. In der kurzfristigen Planung und der operativen Ebene betrifft dies die Festlegung der besten Produktionsreihenfolge und Losgrößenbildung.⁸⁸ Dabei werden vorwiegend heuristische Modelle eingesetzt. Exakte Optimierungsmodelle haben sich noch nicht vollständig etabliert.⁸⁹ Auch Produktionskennlinien werden oft als Entscheidungsgrundlagen herangezogen.

Modelle können ebenso nach Art der Informationen und Datenbeschaffung eingeteilt werden:⁹⁰

- *Quantitative oder mathematische Modelle* beschreiben alle Aspekte mittels kardinal messbaren Informationen. Das bedeutet, dass sie durch reelle Zahlen dargestellt werden. Daten, Datenparameter und Variablen stellen die Elemente des realen Systems dar. Sie werden mittels Gleichungen und Ungleichungen miteinander verknüpft, sodass die Struktur erhalten bleibt. Zur Ermittlung der Lösungen des Entscheidungsproblems können mathematische Methoden angewandt werden.
- *Qualitative Modelle* verwenden zusätzlich zu quantitativen Informationen verbale Prozessbeschreibungen, die durch qualitative, ordinal oder nominal messbare Informationen

⁸¹ Vgl. Biethahn, J. et al. (1999), S. 149 ff.; Kudlich, T. (2000), S. 28 ff.; Nachtwey, A. (2010), S. 29

⁸² Vgl. Wiendahl, H.-P.; Kwok-Wai, Y. (2000), S. 498 f.

⁸³ Vgl. Nachtwey, A. (2010), S. 29

⁸⁴ Vgl. Wiendahl, H.-P.; Kwok-Wai, Y. (2000), S. 501

⁸⁵ Vgl. Beckmann, H. et al. (2014), S. 23; Hartmann, W. et al. (2009)

⁸⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 61

⁸⁷ Vgl. Domschke, W.; Scholl, A. (2000), S. 29

⁸⁸ Vgl. Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. (2005), S. 11 ff.

⁸⁹ Vgl. Nachtwey, A. (2010), S. 33

⁹⁰ Vgl. Domschke, W.; Scholl, A. (2000), S. 29 f.

beschrieben werden. Es werden meist grundlegende Zusammenhänge und Tendenzen dargestellt, die sich auf subjektive Einschätzungen stützen. Die (rein) qualitativen Modelle kommen vorwiegend in der strategischen Planung zur Anwendung um elementare Strategien abzuleiten. Da sich relevante Kenngrößen und Zusammenhänge dieser Modelle wegen ihrer teilweisen Unbestimmtheit schwer analysieren lassen, müssen die qualitativen Informationen quantifiziert werden. Die Herausforderung ist dabei, unvergleichbare Merkmalsausprägungen vergleichbar zu machen.

2.3.2 Prozess der Modellbildung

Im Folgenden werden die Stufen des Modellbildungsprozesses beschrieben (siehe Abbildung 7). Wie die einzelnen Stufen ausgestaltet werden, ist von den jeweiligen anwendungsspezifischen Gegebenheiten abhängig.⁹¹

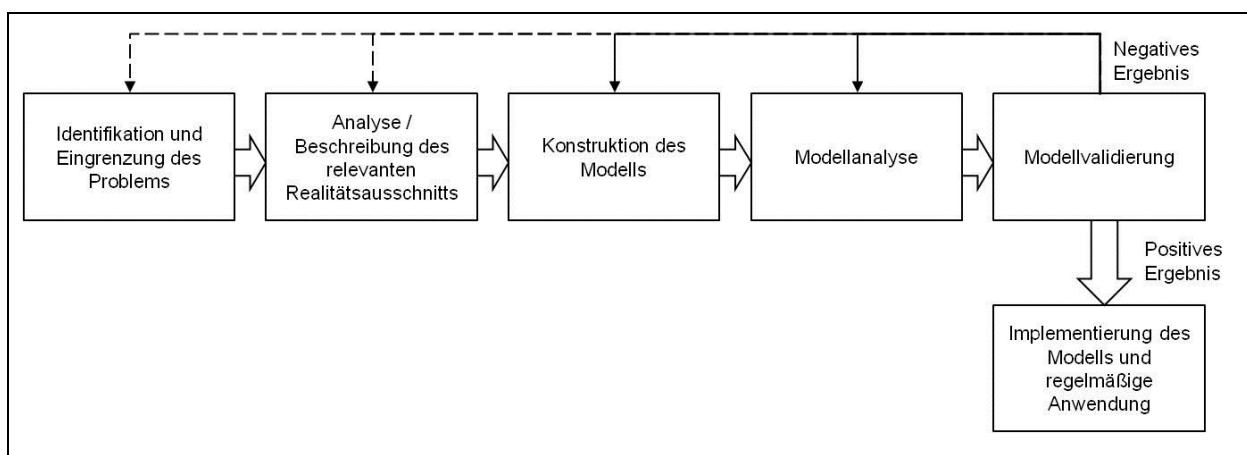


Abbildung 7: Prozess der Modellentwicklung und -analyse⁹²

- In der Problemformulierungsphase gilt es den relevanten Realitätsausschnitt abzugrenzen, das zu lösende Problem zu identifizieren und das zu entwickelnde Modell zu definieren.⁹³
- Danach wird dieser Ausschnitt erfasst und verbal-qualitativ beschrieben. Das Problem wird detailliert untersucht und die Handlungsalternativen herausgearbeitet und anhand der Zielerreichungen bewertet.⁹⁴
- Die Konstruktion des Modells bzw. der Modellbau umfasst die Bildung von Modellprämissen und die Definition von Elementen und deren Beziehungen zueinander. Zusätzlich werden Zielsetzungen oder Zielfunktionen für die Modellberechnung vorgegeben.⁹⁵
- Im Rahmen der Modellanalyse wird eine Lösungsmethode ausgewählt und entwickelt, Daten erhoben und aufbereitet und das Modell berechnet.⁹⁶ Die Datenbeschaffung und -

⁹¹ Vgl. Homburg, C. (1998), S. 36

⁹² Quelle: In Anlehnung an Homburg, C. (1998), S. 37

⁹³ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 24

⁹⁴ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 24

⁹⁵ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 24

⁹⁶ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 24

aufbereitung ist aufwändig, weil interne (z.B. Rechnungswesen, Fertigungsplanung, Finanzwesen) als auch externe Daten (z.B. Marktwachstum, Marktvolumen) benötigt werden. Anhand dieser Daten werden einzelne Modellparameter quantifiziert, welche für die Modellberechnung erforderlich sind.⁹⁷

- In der Stufe der Modellvalidierung wird beurteilt, ob das Modell in Bezug auf den Realitätsausschnitt gültig ist oder ob eventuelle Modellmodifikationen vorgenommen werden müssen. Bei Entscheidungsproblemen können vergangene Ist-Daten in das Modell eingepflegt werden, um es mit den historischen Ergebnissen zu vergleichen.⁹⁸
- Ist das Modell vollständig entwickelt, kann es angewendet werden. Dafür erfolgen eine Beschreibung desselben und die Übergabe an die Anwender.⁹⁹

Das in dieser Arbeit zu entwickelnde Modell ist in der Kategorie der Wirkmodelle einzuordnen (siehe Abbildung 2 Kapitel 1). Es soll explizite Wirkzusammenhänge zwischen produktionslogistischen Zielgrößen erklären und Disponenten bei Entscheidungen unterstützen. Es zeigt jedoch keine Handlungsalternativen auf und ist deswegen nicht den Entscheidungsmodellen zuzuordnen. Der in diesem Abschnitt theoretisch aufgearbeitete Modellbildungsprozess wird in der Umsetzung des Fallbeispiels praktisch angewendet und in Abschnitt 6.3 dargestellt.

2.4 Systemtheorie

Diese Theorie ist daraus entstanden, dass Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen sich mit gleichartigen (in einer abstrakten Form dargestellten) Problemen beschäftigten. Sie versuchten Erkenntnisse aus verschiedenen Wissenschaften für einander nutzbar und vergleichbar zu machen. Daraus ist der Begriff der allgemeinen Systemtheorie entstanden.¹⁰⁰ Durch eine gemeinsame Terminologie wird der Zugang zu anderen Disziplinen geöffnet. Die Systemvorstellung dient als Ausgangspunkt für inhaltlich differierende Betrachtungsweisen. Sie erfasst neben realen Zusammenhängen ideelle, vor allem vielgliedrige Ursache-Wirkungsbeziehungen. Dadurch können komplexe Vorgänge in Unternehmungen gut erfasst und bisher unbekannte Zusammenhänge identifiziert werden. Der Systemansatz kann bei Systemen angewendet werden, die nicht der gleichen Art sind, aber passend abstrahiert werden können. So ist dieser Ansatz zusätzlich zur Erkenntnisgewinnung für die Konstruktion von Gestaltungsmodellen einsetzbar.¹⁰¹

2.4.1 Grundlagen und Merkmale von Systemen

BEER¹⁰² stellt fest: „Wenn wir die in einem in sich geschlossenen Ganzen wirksamen Wechselbeziehungen kennenlernen wollen, so müssen wir dieses Ganze als Teil eines Systems betrachten.“ Der Begriff System umfasst eine Menge an Elementen die miteinander in Beziehung

⁹⁷ Vgl. Homburg, C. (1998), S. 39

⁹⁸ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 25

⁹⁹ Vgl. Gal, T.; Gehring, H. (1981), S. 25

¹⁰⁰ Vgl. Ulrich, H. (2001), S. 42

¹⁰¹ Vgl. Ulrich, H. (1970), S. 135 f.

¹⁰² Beer, S. (1962), S. 25

stehen. Das Wort steht für Konnektivität. Dabei liegt die Herausforderung darin, das System genau festzulegen und in Betracht der Ganzheit des übergeordneten Systems und der Untersysteme einzuschränken.¹⁰³

Begrifflichkeiten

Systeme bestehen aus Elementen, deren Eigenschaften und Funktionen und den Beziehungen zwischen den Elementen. Unter „Elemente“ sind die Bausteine eines Systems zu verstehen. Ihnen sind Eigenschaften, wie beispielsweise Farbe und Funktionen, die den Zweck wiedergeben zugeordnet. Elemente können wiederum Systeme sein. Beziehungen verbinden diese. Sie können Materialflüsse, Informationsflüsse, Wirkzusammenhänge etc. sein.¹⁰⁴ Abbildung 8 zeigt die Grundbegriffe eines Systems.

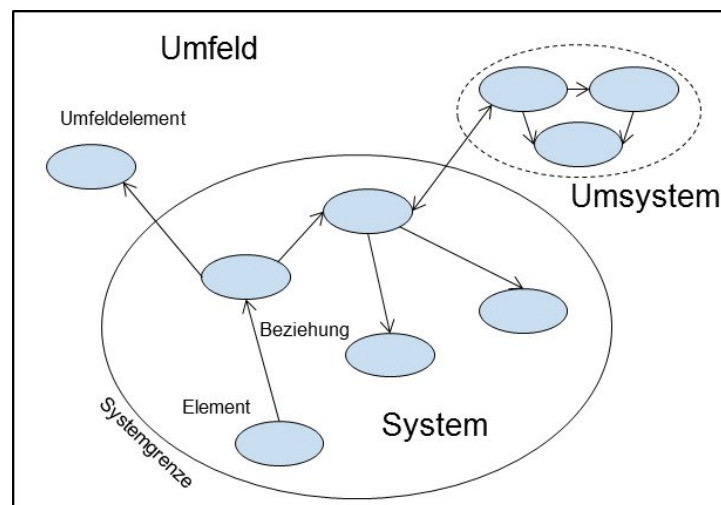


Abbildung 8: Grundbegriffe eines Systems¹⁰⁵

Systemgrenzen und Umfeld

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass Elemente bestehen, die im und außerhalb des Systems liegen. Die Elemente, die sich außerhalb der Systemgrenze befinden und berücksichtigt werden, bilden die Umwelt oder Umgebung. Die Abgrenzung und Definition der Umwelt und des Systems ist vor allem für die praktische Arbeit wichtig. So kann sich die Konzentration auf die Elemente beziehen, die das System beeinflussen oder von diesem beeinflusst werden. Wobei zwischen geschlossenen (es bestehen keine Beziehungen zwischen System und Umwelt) und offenen (es gibt Beziehungen nach außen) Systemen unterschieden wird.¹⁰⁶

¹⁰³ Vgl. Beer, S. (1962), S. 24 f.

¹⁰⁴ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 34

¹⁰⁵ Quelle: In Anlehnung an Haberfellner, R. et al. (2012), S. 34

¹⁰⁶ Vgl. Nagel, P. (1977), S. 19 f.

Struktur

Das Gefüge von Elementen und Beziehungen weist eine Ordnung auf. Diese wird als Struktur eines Systems bezeichnet. Eine Struktur ist durch Anordnungsmuster und Orientierungsprinzipien der Elemente und Beziehungen geprägt. Hierarchische Struktur, Sternstruktur und Netzwerkstruktur können u. a. als Beispiele genannt werden.¹⁰⁷

Bei einem hierarchischen Systemaufbau oder Systemhierarchie wird das System in mehrere Stufen unterteilt: System, Untersystem und Element. Die unterste Auflösungsstufe ist die Elementebene, sie wird nicht mehr weiter untergliedert und ihre Elemente werden als Blackboxes angesehen. Zwischen dem betrachteten System und den Elementen liegen die Untersystemstufen.¹⁰⁸

Blackboxes werden eingesetzt, wenn Phänomene keine Bedeutung haben, oder derzeit unbekannt sind. Bei der Betrachtung mittels Blackbox liegt der Fokus auf der Funktion, den Inputs und Outputs. Somit wird die Komplexität reduziert. Im Gegenzug davon gibt es eine Whitebox-Betrachtung, bei der der genaue Zusammenhang zwischen den Eingängen und Ausgängen im Mittelpunkt steht. Eine Greybox ist die dritte Betrachtungsweise, bei der eine grobe Struktur erkennbar ist.¹⁰⁹

2.4.2 Systemdenken

Mit dem Ansatz des Systemdenkens sollen komplexe Situationen überschaubar gemacht werden, indem die Realität in besonderer Art zu sehen ist. Im Kontrast zum lokalen, isolierten und abteilungsbezogenen Denken ist Systemdenken interdisziplinär bezüglich der Wissensgebiete oder Bereiche innerhalb von Organisationen.¹¹⁰

In der Realität bestehen Systeme in denen vieles mit vielem verbunden ist und Wirkzusammenhänge untereinander bestehen. Oft wird eine Fehlleistung in einem Gesamtsystem auf ein Element reduziert (Sündenbock). Im Systemdenken wird vom Gegenteil ausgegangen. Der Fehler wird in der Struktur des Systems oder der fehlenden Lenkungsbeziehungen und Kommunikation vermutet. Ein Systemdenker beschäftigt sich mit Fragen welches System es ist, wie die Umwelt ausschaut, wie die Beziehungen zwischen dieser und dem System gegeben sind, oder welche Elemente das System enthält. Wichtig dabei ist das Ganze zu sehen – den Gesamtzusammenhang zu verstehen – und dennoch Unwichtiges auszublenden.¹¹¹

2.4.3 Betrachtungsperspektiven

Ein System kann unterschiedlich dargestellt werden. Je nach dem worauf sich die Betrachtung fokussieren soll, wird das System aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet.

¹⁰⁷ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 35

¹⁰⁸ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 38

¹⁰⁹ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 39

¹¹⁰ Vgl. Züst, R. (2004), S. 25

¹¹¹ Vgl. Ulrich, H. (2001), S. 45 ff.

Umfeldorientierte Betrachtungsweise

Bei dieser Betrachtung wird das System als Blackbox angesehen. Der Fokus liegt bei den Beziehungen zwischen dem System und der Umgebung. Dabei werden die Umsysteme – durch Art und Umfang der externen Faktoren beschrieben – und die Beziehungen zum betrachteten System getrennt betrachtet. Es sollen die externen Faktoren identifiziert werden, die in irgendeiner Form Einfluss auf das System ausüben.¹¹²

Wirkungsorientierte Betrachtungsweise

Hier wird das System ebenfalls als Blackbox angesehen, jedoch sind die Eingangs- und Ausgangsgrößen Ziel dieser Betrachtung anstatt des Umfelds. Es wird untersucht, welche Ausgangsgrößen bzw. Auswirkungen auf das Umfeld durch welche Eingangsgrößen bzw. Einwirkungen durch das Umfeld entstehen. Die Verhaltensmöglichkeiten des Systems werden dabei berücksichtigt. Ist die Funktion, wie der Input in Output umgewandelt wird, bekannt, nennt man dies eine Übergangsfunktion. Wie die Wirkzusammenhänge innerhalb des Systems aussehen ist dabei irrelevant (Blackbox). Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 9 abgebildet. Können diese nicht vollständig ignoriert werden, geht die Betrachtung zur Greybox über.¹¹³

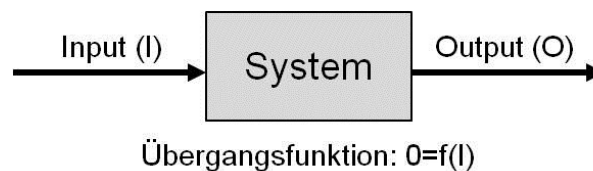


Abbildung 9: Blackbox mit Input-Output-Beziehung¹¹⁴

Aufgrund der Verallgemeinerung der Strömungsgrößen (materieller, informationeller und energetischer, wie zum Beispiel Material-, Informations- und Energieflüsse) in Wirkungen, können abstrakte Flüsse, wie beispielsweise Werteflüsse oder psychologische Wirkungen, wie Strömungsgrößen behandelt werden.¹¹⁵

Die wirkungsorientierte Betrachtung hilft die Qualität und den Zustand eines Systems einzuschätzen. Damit können Problemfelder und Lösungen grob charakterisiert werden.¹¹⁶

Strukturorientierte Betrachtungsweise

Wie die Bezeichnung schon sagt, werden der strukturelle Aufbau eines Systems und die strukturellen Zusammenhänge im System betrachtet. Im Vordergrund stehen die Elemente und deren Beziehungen. Vorwiegend bezieht sich das Interesse auf die dynamischen Wirkmechanismen und Abläufe. Es liegt die Frage zugrunde, wie der Output aus dem Input generiert wird bzw. wie der Input verarbeitet werden soll um den gewünschten Output zu erhalten. Flussstrukturen, Prozessstrukturen, Wirkmechanismen u. ä. stehen dabei besonders im Fokus.¹¹⁷

¹¹² Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 42

¹¹³ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 42 f.

¹¹⁴ Quelle: In Anlehnung an Haberfellner, R. et al. (2012), S. 38

¹¹⁵ Vgl. Nagel, P. (1977), S. 15

¹¹⁶ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 43

¹¹⁷ Vgl. Haberfellner, R. et al. (2012), S. 43

Auf welches System sich das zu entwickelnde Wirkmodell bezieht und wo die Grenzen gezogen werden, wird in Abschnitt 5.1 erläutert. Abbildung 2 in Kapitel 1 zeigt jedoch schon, dass sich das Modell auf eine Einzelanlage beziehen soll. Die Begründung dafür wird am Ende des folgenden Abschnitts gegeben.

Allgemein stellt ULRICH¹¹⁸ fest: „Systeme können einfacher oder komplizierter sein, so daß ihre geistige Erfassung bzw. praktische Beherrschung leichter oder schwieriger ist.“

2.5 Komplexitätstheorie

Unternehmen stehen zunehmend unter Druck sich permanent weiterzuentwickeln, individuelle Leistungsangebote zu erstellen und auf den Markt flexibel zu reagieren. Dies führt zu steigendem Koordinationsbedarf und hoher Komplexität mit dem die Unternehmen umgehen müssen.¹¹⁹ Der Marktwandel, der vorerst eine unternehmensexterne Komplexität mit sich bringt, erhöht die interne Komplexität. Das heißt, die Anzahl der Elemente in einem System, zwischen denen Beziehungen bestehen und koordiniert werden müssen, nehmen zu. Wobei der Grad der Komplexität vor allem von der Anzahl der Kopplungen und von der Variabilität der Aktionen abhängt. So gilt ein System als weniger komplex, wenn geringe Veränderungen der Aktionen während der Zeit stattfinden und als komplex, wenn ständige Anpassungen der Aktionen erforderlich sind. Je mehr Elemente in einem Unternehmen zum Beispiel Produkte, Teile, Kunden, Organisationseinheiten etc. abgestimmt werden müssen, je mehr Beziehungen zwischen diesen bestehen und je öfter sich diese Beziehungen verändern, desto höher ist die Unternehmenskomplexität.¹²⁰ Komplexe Produktionssysteme zeichnen sich durch einen zeitlich veränderlichen Produktmix, unterschiedliche Prozesstypen, vorgeschriebene Kundenendtermine, komplexe Arbeitspläne, Umrüstzeiten, die vom Produktionsprogramm abhängig sind und parallele Maschinen aus.¹²¹

2.5.1 Komplexität und -theorie

Da der Begriff der Komplexität breit in wissenschaftlichen Disziplinen verwendet wird, von mikroskopischen (Biologie) bis makroskopischen Fächern (Soziologie), gibt es kein einheitliches Verständnis.¹²² Umgangssprachlich werden oft Kompliziertheit, Unverständlichkeit und Unübersichtlichkeit als Synonym verwendet.¹²³ Das Wort komplex leitet sich vom lateinischen „complexum“ bzw. „complecti“ ab, das umschlingen, umfassen oder zusammenfassen bedeutet.¹²⁴

MALIK¹²⁵ beschreibt den Begriff als Tatsache, dass reale Systeme zahlreiche Zustände annehmen können.

¹¹⁸ Ulrich, H. (1970), S. 115

¹¹⁹ Vgl. Adam, D.; Johannwille, U. (1998), S. 5

¹²⁰ Vgl. Adam, D. (1998), S. 30

¹²¹ Vgl. Mönch, L. (2006), S. 1

¹²² Vgl. Bronner, R. (1992), S. 1121 f.

¹²³ Vgl. Malik, F. (2008), S. 167

¹²⁴ Bibliographisches Institut GmbH, <http://www.duden.de/rechtschreibung/komplex> (Zugriff: 23.03.2015)

¹²⁵ Vgl. Malik, F. (2008), S. 168

ADAMS¹²⁶ Definition geht zusätzlich auf die Merkmale eines Zustands im Sinne der Vielschichtigkeit ein.

Nach BRONNER bezieht sich die „Komplexität im engeren Sinn (...) auf die bloße Anzahl von Systembausteinen.“¹²⁷

Zusätzlich verweist MALIK¹²⁸ auf den Begriff der Varietät, mit der man Komplexität quantifizieren kann. „Varietät ist die Anzahl der unterscheidbaren Zustände eines Systems bzw. die Anzahl der unterscheidbaren Elemente einer Menge.“¹²⁹

Demnach sind komplexe Systeme jene, die keine Vereinfachung zulassen und vielschichtig sind. Gekennzeichnet sind diese durch Eigenschaften wie:¹³⁰

- Wechselwirkung (Zwischen Elementen eines Systems bestehen vielfältige und teilweise schwer überschaubare Beziehungen)
- Emergenz (Eine Systemebene steht mit einer anderen in Wechselwirkung)
- Nichtlinearität/Eigenverhalten (Durch kleine Störungen, verschiedener Rückkopplungen und Eigenverhalten der Elemente werden unterschiedliche, sehr begrenzt vorhersehbare Ergebnisse oder Auswirkungen hervorgerufen)
- Pfade (Ergebnisse hängen nicht nur vom zeitlichen Verhalten eines Systems ab, sondern auch vom Pfad, der Vorgeschichte des Systems)
- Offenes System (Komplexe Systeme reagieren mit ihrer Umwelt. Sie werden davon beeinflusst und stehen mit ihr in Kontakt)

Die Komplexitätstheorie ist eine Weiterentwicklung der Systemtheorie und der Kybernetik. In dieser Theorie wird untersucht, unter welchen Bedingungen Chaos in Ordnungsstrukturen und organisierte Komplexität umgewandelt werden kann. Sie benutzt bestehende Verhaltensweisen und Strukturen komplexer Systeme, um durch synthetische Rekonstruktion, einen Rückschluss auf generelle Verhaltens- und Entwicklungsprinzipien zu ziehen. Dafür bezieht sie Informationen und Wissen aus zahlreichen anderen Wissenschaftsdisziplinen, die sich mit komplexen Systemen beschäftigen und erforschen.¹³¹

2.5.2 Dimensionen der Komplexität

In einem Unternehmen als komplexes System gibt es unterschiedliche Bereiche, auf die Komplexität Auswirkungen hat. Im folgenden Abschnitt wird auf die Komplexität in Bezug auf Ziel, Kunden und Varianten, Teile und Fertigungssysteme und Koordination eingegangen.

¹²⁶ Vgl. Adam, D. (1998), S. 30

¹²⁷ Vgl. Bronner, R. (1992), S. 1122

¹²⁸ Vgl. Malik, F. (2008), S. 168

¹²⁹ Malik, F. (2008), S. 168

¹³⁰ Vgl. Biedermann, H. (2006), S. 10; Rüegg-Stürm, J. (2003), S. 18

¹³¹ Vgl. Kirchof, R. (2003), S. 33

Zielkomplexität

Durch den Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt sind die Schwierigkeiten in Betracht des Zielsystems in einem Unternehmen stark angestiegen. Früher war das oberste Ziel die Kapazitätsauslastung hoch zu halten und damit den Gewinn zu steigern. Mit der Verlagerung zum Käufermarkt wurden die Leistungsvielfalt, Termintreue und kurze Lieferzeiten wichtiger und ausschlaggebend für hohe Absatzzahlen und den Gewinn. Diese Zielgrößen stehen in Konkurrenz zueinander (Dilemma der Ablaufplanung). Der Disponent muss deswegen in Bezug auf den Käufermarkt entscheiden, welche Ziele aus Sicht der Käufer höhere Prioritäten zu Teil kommen. In manchen Kaufsegmenten ist die Termintreue ein Entscheidungskriterium, während in anderen es wichtig ist schnell liefern zu können. Die Kunden haben keine einheitliche Zielvorstellung. Zusätzlich zu den zeitorientierten Zielen kommen hohe Qualitätsanforderungen und niedrige Kosten als konkurrierende Ziele hinzu. So kann beispielsweise eine kurze Produktionszeit auf Kosten der Qualität gehen, oder eine hohe Termintreue zu steigenden Kosten führen. Das Unternehmen muss das Bündel an konfliktären Zielen abstimmen. Je mehr Ziele verfolgt werden, desto höher sind der Komplexitätsgrad und der Koordinationsaufwand. Dadurch steigt der Aufwand für die Beschaffung und sinnvolle Verarbeitung von Informationen.¹³²

Kunden- und Variantenkomplexität

Die Verschiebung des Marktes hat u. a. zur Folge, dass mehr auf die Kunden eingegangen wird. Standardprodukte großer Märkte weichen der Individualisierung und Anpassung an kleinere Kundengruppen. Damit wächst die Anforderung an Vermarktungs- und Koordinationskapazitäten. Wegen der Segmentierung der Kunden und der dadurch bedingten Differenzierung der Vertriebswege, steigt in diesem Bereich der Kapazitätsbedarf. Um die Kundenzufriedenheit zu erhöhen werden speziell zugeschnittene Problemlösungen angeboten. Dies führt zu einer drastischen Steigerung der Varianten- und Artikelanzahl. Dies bewirkt, abgesehen von den Herausforderungen im Vertriebsbereich, große Koordinationsprobleme in den Bereichen Logistik, Produktion und Beschaffung. Deswegen wird versucht den Kundenentkopplungspunkt so weit wie möglich im Produktionsprozess nach hinten zu verschieben und möglichst lange ein Standardprodukt zu fertigen.¹³³

Teilekomplexität und Komplexität des Fertigungssystems

Mit der Anzahl der Varianten geht die Erhöhung der benötigten Teile einher. Standardisierte Teile werden immer weniger und der Umfang von kundenspezifischen Teilen wird größer. Wobei die Teilekomplexität überproportional zur Variantenkomplexität steigt, da meist eine neue Variante viele zusätzliche Teile inkludiert. Somit wird der Koordinationsbedarf in der Produktion, Logistik und Beschaffung nochmals erhöht. Fertigen Unternehmen viele Teile selbst, wird das Komplexitätsproblem verschärft. Sie könnten die Produktion mancher Teile outsourcen um die Konkurrenz um knappe Kapazitäten zu entspannen.¹³⁴

¹³² Vgl. Adam, D. (1998), S. 33 f.

¹³³ Vgl. Adam, D. (1998), S. 35 f.

¹³⁴ Vgl. Adam, D. (1998), S. 36

Die Umstellung von wenigen Produkten in großen Mengen auf viele Produkte in kleinen Mengen hat für die Produktion und das Fertigungssystem Folgen. Die Produktion muss öfters auf andere Erzeugnisse umgestellt werden, wodurch ein häufigeres Rüsten erforderlich wird. Dadurch ist ein Fließprinzip oftmals nicht mehr möglich und es muss in Werkstattfertigung produziert werden. Es kommt zu vernetzten Produktionsstrukturen und Materialflüsse, die koordiniert werden müssen. Durch die Diskontinuität im Materialfluss kann es zu längeren Zwischenlagerungen von Material und Halbfertigprodukten kommen.¹³⁵

Koordinationskomplexität

Die Koordinationsaufgabe hat sich durch die Dynamik, die durch den Marktwandel entstanden ist, vollkommen geändert. Es gibt keine langfristige Optimallösung, weil keine stabilen Verhältnisse bestehen und die Zukunft nicht vorhersehbar ist. Unvorhersehbare Datenänderungen wie neue Zusatzaufträge oder ungeplante Maschinenausfälle zwingen das Unternehmen schnell zu reagieren und machen langfristig koordinierte Lösungen unvorstellbar.¹³⁶ Deswegen kommt der Koordinationsaufgabe eine andere Bedeutung zu: „Es geht darum, die Entscheidungen der Unternehmensbereiche laufend an Umweltänderungen anzupassen. Eine solche Koordination erfordert hohe Flexibilität und kurze Reaktionszeiten.“¹³⁷

Die Koordinationskomplexität ist stark vom Problem der unvollkommenen Information geprägt. Um erfolgreich zu sein, sind Informationen über zukünftige Entwicklungen wichtig. Aufgrund der Dynamik des Marktes ist es schwierig diese zu bekommen, was die Koordination erschwert. Unternehmen können sich bei Entscheidungen nicht mehr vollends auf Datenentwicklungen stützen, weil es zu unsicher ist. Deswegen werden Aspekte der Risikopolitik zusätzlich zu Gewinnüberlegungen in die Koordination integriert.¹³⁸

Diese Komplexitätsarten gilt es zu reduzieren, denn „Spitzenleistungen von Unternehmen sind ‚überraschend deutlich gekoppelt‘ an überdurchschnittliche Einfachheit und Umsetzungsstärke in der strategischen und operativen Führung“¹³⁹.

In der Ausgangssituation in Kapitel 1 wird vor allem die Zielkomplexität angesprochen, welche die Problematik auslöst und nach einem neuen Modell verlangt. Hinzu kommen bei der Prozessindustrie die Varianten- und Koordinationskomplexität sowie jene des Fertigungssystems. Darauf wird in Abschnitt 3.3 genauer eingegangen. Das Modell muss komplex genug sein um dieser Komplexität gerecht zu werden, jedoch soll es für die Mitarbeiter einfach bedienbar und mittels einer geringen Datenmenge auszuwerten sein. Aus diesem Grund wurde der Fokus der Analyse auf Einzelanlagen gelegt. So ist die Entwicklung des Modells komplex, jedoch die Anwendung und Auswertung so simpel wie möglich gehalten.

¹³⁵ Vgl. Adam, D. (1998), S. 36 f.

¹³⁶ Vgl. Adam, D. (1998), S. 37

¹³⁷ Adam, D. (1998), S. 37

¹³⁸ Vgl. Adam, D. (1998), S. 39

¹³⁹ Dreher, C. et al. (1995), S. 9

2.6 Zusammenfassung und Forschungsdesign

Aufbauend auf Abschnitt 1.4 bilden die wissenschaftstheoretischen Grundlagen die Basis für das Forschungsdesign.

Im entscheidungsorientierten Ansatz stehen Grundmodelle im Focus, die das Wissen aus Betriebswirtschaft und Nachbarwissenschaften kombinieren und vereinen. HEINEN stellt den Menschen bzw. die Gruppe und Organisation in den Mittelpunkt von Entscheidungsprozessen und gibt an, dass neben Kosten und Umsatz ebenso Macht und Prestige Ziele von Entscheidungen sind. Dies war für die Entwicklung des Modells wichtig, da die Problematik aus der Praxis kommt und das Modell in der Praxis angewendet werden soll. Im Sinne des Action-Research-Ansatzes wurden im Unternehmen Informationen beschafft, welche in die Entwicklung eingeflossen sind. Genauso wie im entscheidungsorientierten Ansatz werden in der Modellbildungstheorie verschiedene Fachdisziplinen zusammengefügt. Modelle können in unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. Zu den Beschreibungsmodellen gehört beispielsweise das Prozesskettenmodell. Die Produktionskennlinie und die Warteschlangentheorie sind Beispiele für Wirkmodelle bzw. Erklärungsmodelle und zu den Entscheidungsmodellen wird das mathematische Modell gezählt. Das zu entwickelnde Modell soll ein Wirkmodell sein, welches sich mit den Ursache-Wirkung-Zusammenhängen der logistischen Zielgrößen – Auslastung und Bestand – befasst. Ein Modell ist die Abbildung eines realen Systems, welches sich in diesem Fall auf eine Einzelanlage bezieht, die sich am Ende der Betrachtung in das Große und Ganze, den Produktionsbereich, eingliedert. Denn beim Systemdenken sollen komplexe Sachverhalte überschaubar gemacht werden. Es geht darum, das Ganze samt Verbindungen und Zusammenhängen zu sehen und Unwichtiges auszublenden. Dabei beschäftigt man sich mit den Systemelementen, dem Umfeld und der Struktur eines Systems. Die Anzahl der Elemente in einem System zwischen denen Beziehungen bestehen und koordiniert werden müssen, nehmen zu. Damit steigt die Komplexität. Die Ausgangssituation dieser Arbeit betrachtend bezieht sich dies vor allem auf die Zielkomplexität in der Prozessindustrie, welche durch die Komplexität der Fertigungssysteme und der Variantenkomplexität in dieser Branche verstärkt wird. Da Varietät nur mit Varietät bewältigt werden kann, welche das Maß für die Komplexität ist, liegt die Herausforderung darin ein komplexes Modell zu entwickeln, welches jedoch in der Anwendung einfach zu bedienen und zu verstehen ist. Darauf ist bei der Entwicklung zu achten.

3 Grundlagen der Produktionswirtschaft

*„Wir arbeiten nicht nur, um etwas zu produzieren,
sondern auch um der Zeit einen Wert zu geben.“
Eugène Delacroix (1798-1863), französischer Maler*

Um ein einheitliches Verständnis für Begrifflichkeiten zu schaffen, werden zu Beginn des Kapitels die grundlegenden Begriffe definiert und festgelegt. In weiterer Folge sind Methoden der Produktionswirtschaft angeführt und Kennzahlen beschrieben, die für diese Arbeit und das darin entwickelte Modell essentiell sind. Um die Anwendbarkeit und Struktur der Produktionskennlinien im darauffolgenden Kapitel verstehen zu können, wird hier auf die vorgelagerten Themen wie dem Trichtermodell und dem Durchlaufdiagramm eingegangen.

3.1 Zentrale Begriffe

Mit folgenden Begrifflichkeiten werden in dieser Dissertation gearbeitet:

Produktion

Die methodische Erstellung von Sachgütern und Dienstleistungen werden unter dem Begriff der Produktion verstanden. Dies umfasst das Planen, Steuern und Überwachen der Produktion sowie die Auswahl der Mittel, denen nachvollziehbare Ziele vorgegeben sind. Dies setzt voraus, dass der Mensch bei diesen Tätigkeiten involviert ist. Somit fällt ein Prozess, der ohne den Menschen stattfindet nicht unter den betriebswirtschaftlichen Begriff der Produktion.¹⁴⁰

Produktionssystem

Das Produktionssystem ist ein Subsystem eines übergeordneten Systems, wie das des Unternehmens¹⁴¹, welches wiederum in weitere Subsysteme untergliedert werden kann. In diesem System werden Produktionsaufgaben, die durch das Produktionsprogramm vorgegeben werden, erfüllt. Es besteht aus Elementen und den Relationen zwischen diesen. Die Elemente sind sowohl technischer (technische Herstellungsprozesse) als auch organisatorischer (Steuerung, Planung) Natur und verfolgen den Zweck der Produktion.¹⁴²

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, besteht das Produktionssystem ebenfalls aus Input, Throughput (Produktionsprozess) und Output und ist so ausgerichtet, dass das Unternehmensziel erreicht wird.¹⁴³ Veranschaulicht wird dies in Abbildung 10.

¹⁴⁰ Vgl. Blohm, H. et al. (2008), S. 27

¹⁴¹ Laut Ulrich (Vgl. Ulrich, H. (1970), S. 153 ff.) ist ein Unternehmen ein produktives, soziales, komplexes, reales und dynamisches System, das der Umwelt gegenüber offen ist

¹⁴² Vgl. Eversheim, W. (1992), S. 2058 f.

¹⁴³ Vgl. Schiefer, E. (2009), S. 32

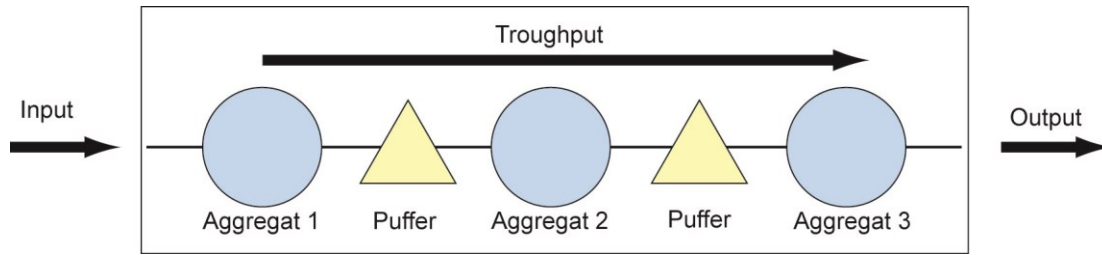
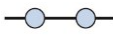
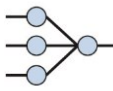
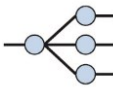
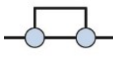


Abbildung 10: Produktionssystem¹⁴⁴

Der Produktionsprozess verarbeitet den Input in Output und ist die systemtheoretische Bezeichnung für die Leistung des Produktionssystems. Damit wird der eigentliche Produktionsvorgang beschrieben. Der Produktionsprozess kann sich aus mehreren beliebig verketteten Anlagen zusammensetzen, die durch den Materialfluss miteinander verbunden sind. Durch Puffer können die Anlagen voneinander entkoppelt sein. Sie dienen zur Überbrückung von Störungen und zum Ausgleich von Belastungsschwankungen.¹⁴⁵

Es bestehen vier verschiedene Arten von Materialflüssen, die aus den verschiedenartigen Anforderungen an den Produktionsprozess resultieren. Diese sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Materialflussarten¹⁴⁶

Symbol	Bezeichnung	Beschreibung
	linear	Jeder Prozessschritt hat maximal einen Vorgänger und Nachfolger.
	konvergierend	Eine Anlage hat mehrere Vorgänger.
	divergierend	Ein Prozessschritt hat mehrere Nachfolger.
	zyklisch	Der Produktionsprozess umfasst eine Anlage mehrmals.




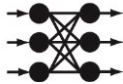
Wird die Beziehung zwischen In- und Output betrachtet werden die vier Gruppen wie folgt bezeichnet (siehe Tabelle 3).

¹⁴⁴ Quelle: In Anlehnung an Löschnauer, J. et al. (2006), S. 95

¹⁴⁵ Vgl. Gutenberg, E. (1983), S. 16 ff.; Schiefer, E. (2009), S. 32

¹⁴⁶ Quelle: In Anlehnung an Günther, H.-O. (2004), S. 326; Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. (2005), S. 19 f.; Schiefer, E. (2009), S. 32 f.

Tabelle 3: Beziehungen zwischen In- und Output¹⁴⁷

Symbol	Bezeichnung	Beschreibung
	durchgängig	Ein Input-Objekt wird in ein Output-Objekt umgeformt.
	synthetisch	Mehrere Input-Objekte werden zu einem Output-Objekt zusammengefasst.
	analytisch	Ein Input-Objekt wird in mehrere Output-Objekte zerlegt.
	analytisch-synthetisch	Aus mehreren Input-Objekten werden mehrere Output-Objekte.

Produktionswirtschaft

„Die Produktionswirtschaft befasst sich mit allen betriebswirtschaftlichen Fragen der Produktion, sie dient der Erreichung und Sicherung wirtschaftlicher Produktionsstrukturen und -abläufe.“¹⁴⁸ Sie befasst sich mit der ökonomisch orientierten Analyse von Produktionssystemen und ist Teil der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktionswirtschaft hängt eng mit anderen speziellen Gebieten der BWL wie beispielsweise der Logistik, der Umweltwirtschaft, oder dem Internen Rechnungswesen zusammen.¹⁴⁹

3.2 Produktionsplanung

„Die Produktionsplanung befaßt sich mit der Planung herzustellender Produkte, der dafür erforderlichen Produktionsfaktoren sowie der Planung des eigentlichen Produktionsprozesses.“¹⁵⁰ Teilbereiche der Produktionsplanung sind die Produktionsprogramm-, Bereitstellungs- und Produktionsprozessplanung. Des Weiteren kann diese in die strategische, taktische und operative Produktionsplanung unterteilt werden:¹⁵¹

- In der strategischen Produktionsplanung werden langfristige Entscheidungen bezüglich des Produktionsprogramms und der Bereitstellung getroffen. Es wird definiert, welche und in welcher Menge Produkte und Dienstleistungen zu erstellen und welche Betriebsmittel dafür notwendig sind. Dazu gehören die Wahl des Standortes und Entscheidungen bezüglich der Organisation der Fertigung.

¹⁴⁷ Quelle: In Anlehnung an Adam, D. (1998), S. 14 f.

¹⁴⁸ Blohm, H. et al. (2008), S. 27

¹⁴⁹ Vgl. Dyckhoff, H. (2000), S. 5

¹⁵⁰ Domschke, W. et al. (1997), S. 8

¹⁵¹ Vgl. Domschke, W. et al. (1997), S. 8

- Die taktische Produktionsplanung detailliert die Vorgaben der strategischen Planung. Es wird ein genaues Produktionsprogramm (Produktart und Menge) festgelegt und die mittelfristige Kapazitätsplanung vorgenommen. Darin wird über maschinelle Anlagen, Personal, Lagerbestände und Eigen- oder Fremdfertigung entschieden.
- Im Rahmen der operativen Produktionsplanung wird kurzfristige über die Bereitstellung der Werkstoffe und die Produktionsprozessplanung entschieden. Wobei unter kurzfristig die wöchentliche oder tägliche Planung verstanden wird.

In der Produktionsplanung sind bis zu vier Planungsblöcke inkludiert:¹⁵²

- Produktionsprogrammplanung
- Produktionsdurchführungsplanung (Produktionsprozessplanung)
- Bereitstellungsplanung
- Demontageplanung für Altprodukte

Für das Themengebiet dieser Arbeit ist der vierte Block irrelevant.

Produktionsprogrammplanung

Hier wird festgelegt welche Produkte in welcher Menge gefertigt werden. In Bezug auf die Frisrtigkeit kann zwischen dem potenziellen und aktuellen Produktionsprogramm unterschieden werden. Im Zuge des potenziellen Produktionsprogramms werden die Erzeugnisstruktur, die Erzeugnisstandardisierung und die Art der Auftragserteilung bestimmt. Dabei umfasst die Erzeugnisstruktur die Anzahl der Fertigungsstufen und der Produktarten. Beides muss in Bezug auf die Technologie und die zeitliche Kapazität abgestimmt werden. Je mehr zeitlich-kapazitive und technologische Zusammenhänge zwischen Produktkomponenten über mehrere Produktionsstufen existieren, umso komplexer sind die Abstimmungsprozesse und die Planung und Steuerung der Prozesse selbst. Unter Erzeugnisstandardisierung wird die Ausrichtung der Erzeugniseigenschaften an einen anonymen Käuferkreis verstanden. Sie passen sich nicht an individuelle Kundenbedürfnisse an, sondern orientieren sich an den Marktanalysen.¹⁵³

Die aktuelle Produktionsprogrammplanung arbeitet eng mit der Beschaffungs- und Absatzplanung zusammen. Sie legt unter den Vorgaben der strategischen und taktischen Planung die tatsächlich herzustellenden Produkte in Art, Menge und Zeit fest. Dies inkludiert die Planung der Produktionskapazitäten und Beschaffungsmöglichkeiten.¹⁵⁴

Produktionsprozessplanung

„Die **Produktionsprozessplanung** oder **Produktionsdurchführungsplanung** beschäftigt sich mit der zeitlichen, mengenmäßigen und räumlichen Planung des Produktionsvollzugs auf Wochen-, Tage- oder Stundenbasis“¹⁵⁵. Durch die Vorgaben nach dem Produktionsprogramm und der Materialbedarfsplanung werden Fertigungsaufträge generiert. Es ist abzustimmen, welche Fertigungsaufträge gemeinsam auszuführen sind, welche Produktiveinheiten zur Bearbeitung

¹⁵² Vgl. Adam, D. (1998), S. 117

¹⁵³ Vgl. Reichwald, R.; Dietel, B. (1991), S. 462 ff.

¹⁵⁴ Vgl. Domschke, W.; Schöll, A. (2000), S. 10

¹⁵⁵ Domschke, W. et al. (1997), S. 15

dieser benötigt werden und in welcher Intensität. Des Weiteren folgen die Bestimmung der benötigten Werkstoffe und die Reihung der Fertigungsaufträge und die zeitliche Festlegung derselben. Im Groben lässt sich der Planungsprozess in drei Teilbereiche untergliedern: (1) Losgrößenbestimmung, (2) Durchlauf- und Kapazitätsterminierung, (3) Reihenfolgeplanung und Feinterminierung.¹⁵⁶

- *Losgrößenbestimmung*: Im Zuge dieser werden Fertigungsaufträge zu Losen zusammengefasst, wenn es unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Bestimmte Kostenarten sind von der Losgröße abhängig. Somit wird unter Berücksichtigung vorgegebener Restriktionen versucht kostenminimale Losgrößen zu bilden. Ein Los ist die Menge an gleichartigen Objekten, die an einer Anlage ohne Rüsten hintereinander bearbeitet werden.¹⁵⁷
- *Durchlauf- und Kapazitätsterminierung*: Für jeden Fertigungsauftrag müssen die Anfangs- und Endtermine samt den entsprechenden Prüfzeiten festgelegt werden, sodass die gewünschten Fertigstellungstermine erfüllt werden können. Dabei bezieht sich die Durchlaufterminierung auf die Zeit. Anschließend, in der Kapazitätsterminierung, werden die Informationen über den Bedarf an Kapazitäten verwendet, um den Kapazitätsausgleich durchzuführen. Das bedeutet, dass ein Ausgleich zwischen Bedarf und Angebot vorgenommen wird.¹⁵⁸
- *Reihenfolgeplanung und Feinterminierung*: Unter der Berücksichtigung der vorhergehenden Punkte müssen die Arbeitsaufträge in eine Reihenfolge gebracht werden, in der sie abgearbeitet werden sollen (Auftragsreihenfolgeplanung). Zusätzlich ist festzulegen, wann die Aufträge auf einer Maschine bearbeitet werden (Maschinenbelegungsplanung). Durch die Planung der Reihenfolge und der Maschinenbelegung ist es möglich Leer- und Wartezeiten zu beeinflussen und die Verlustzeiten zu reduzieren. Es werden möglichst geringe Lagerkosten und Durchlaufzeiten, sowie möglichst geringe bestandsbedingte Maschinenstillstandszeiten angestrebt.¹⁵⁹

Die Zielsetzungen für die Produktionsprozessplanung, -steuerung und -kontrolle sind:

- „Minimierung der Durchlaufzeiten,
- Minimierung der Bestände und der Kapitalbindung,
- Maximierung der Kapazitätsauslastung,
- Minimierung der Abweichungen von den Lieferterminen,
- Sicherstellung von Qualitätsstandard.“¹⁶⁰

Bereitstellungsplanung

Mittels dieser wird sichergestellt, dass die Betriebsmittel, Werkstoffe und Arbeitskräfte in benötigter Qualität und Quantität zur richtigen Zeit zur Verfügung stehen. Zur Bereitstellung von

¹⁵⁶ Vgl. Domschke, W. et al. (1997), S. 15

¹⁵⁷ Vgl. Domschke, W. et al. (1997), S. 16

¹⁵⁸ Vgl. Domschke, W. et al. (1997), S. 16; Reichwald, R.; Dietel, B. (1991), S. 537

¹⁵⁹ Vgl. Adam, D. (1998), S. 120

¹⁶⁰ Reichwald, R.; Dietel, B. (1991), S. 537

Betriebsmitteln gehören die Planung von immobilien Betriebsmitteln wie Grundstücken und Gebäude und langlebigen maschinellen Anlagen, sowie die betriebliche und innerbetriebliche Standortwahl, die Planung von Layout und Lagern und die Investitionsplanung und Finanzplanung. Die Arbeitskräfte werden über die Personalplanung koordiniert und die Bereitstellung von Werkstoffen wird durch die verbrauchs- oder bedarfsorientierte Planung festgelegt.¹⁶¹

3.3 Die Produktion in der Prozessindustrie

Merkmal der Prozessindustrie sind die verfahrenstechnischen Prozesse, in denen chemische, biologische und thermische Technologien angewendet werden.¹⁶²

SCHÖNSLEBEN beschreibt den Begriff wie folgt: „Die *Prozessindustrie* (auch *grundstoffverarbeitende Industrie* genannt) umfasst die Hersteller, die mit einer sogenannten Prozessherstellung produzieren. *Prozessherstellung* ist eine Produktion, die die Wertschöpfung durch Mixen, Separieren, Umformen oder chemische Reaktion erzielt.“¹⁶³

LOOS fügt hinzu, dass laut dem PRIMA¹⁶⁴-Konsortium „[...] die Hersteller für Produkte der Bereiche Bulk- und Spezialchemikalien, Arzneimittel, Nahrungsmittel und Getränke, Stahl und metallurgische Produkte, Versorgung, Zellstoff und Papier“¹⁶⁵ zur Prozessindustrie gehören. Es besteht eine Abgrenzung zu den Branchen der stückorientierten Fertigungsindustrie, welche vorwiegend geometrisch bestimmte Werkstücke, wie Maschinen-, Anlagen- oder Fahrzeugbau, produzieren.¹⁶⁶

Zusätzlich geben DENNIS und MEREDITH an: „Process industries share numerous many characteristics resulting from the fact that they handle nondiscrete materials.[...] the process industries typically are [...] contrasted from the discrete industries as a whole.“¹⁶⁷ “[...] process industries do differ from each other with respect to process pattern and product mix.“¹⁶⁸

Des Weiteren kann zwischen stoffumformenden, stoffumwandelnden und energieumwandelnden Produktionsprozessen unterschieden werden. Bei der Stoffumformung wird eingebrachten Stoffen eine neue Form gegeben. Darunter fällt sowohl die Formgebung ungeformter Güter als auch das Zusammenführen von Baugruppen oder Teilen und Vorgänge des Trennens, Zerlegens und Zerkleinerns. Die Stoffumwandlung kann einerseits durch chemische oder physikalische Vorgänge erreicht werden. Dabei werden die stofflichen Eigenschaften der Materialien verändert, bzw. diese zu neuen Stoffen verwandelt.¹⁶⁹

- *Physikalische Stoffumwandlung*: Dabei werden die chemischen Verbindungen nicht getrennt und bleiben erhalten. Dies kann durch eine thermische Stoffumwandlung

¹⁶¹ Vgl. Domschke, W. et al. (1997), S. 10 f.

¹⁶² Vgl. Günther, H.-O. (2004), S. 326

¹⁶³ Schönsleben, P. (2011), S. 403

¹⁶⁴ Process Industries Manufacturing Advantage

¹⁶⁵ Loos, P. (1997), S. 3

¹⁶⁶ Vgl. Loos, P. (1997), S. 3

¹⁶⁷ Dennis, D.; Meredith, J. (2000), S. 1085

¹⁶⁸ Dennis, D.; Meredith, J. (2000), S. 1086

¹⁶⁹ Vgl. Fröhling, M. (2006), S. 7 f.

geschehen, die durch Temperatur- und Druckänderungen in Gasen und Flüssigkeiten er-
wirkt wird. Wenn es eine Stoffumwandlung ohne Änderung der Zusammensetzung ist,
wird dies als Heiz- und Kühlprozess, oder Entspannungs- und Verdichtungsprozess be-
zeichnet.¹⁷⁰

- *Chemische und biologische Stoffumwandlung*: Die stoffumwandelnden Verfahren stützen
sich auf die Gesetzmäßigkeiten der chemischen Reaktionstechnik. Dabei gibt es einen
Unterschied zwischen Stoffzerlegungsverfahren und Verfahren zur Stoffverbindung. Ers-
tes wird bei der Reduktion metallischer Erze oder bei der Bierproduktion angewandt. Die
Stoffverbindungsverfahren kommen zum Beispiel bei der Produktion von Kunststoffen o-
der Ammoniak zum Einsatz.¹⁷¹

3.3.1 Besonderheiten der Prozessindustrie

SCHÖNSLEBEN streicht die divergenten Produktionsstrukturen, die Kuppelprodukte, hochvolumige
Linienproduktion, Fließressourcen und inflexible Anlagen sowie große Auftragslose und
Schleifen in der Auftragsstruktur als charakteristisch für die Prozessindustrie heraus.¹⁷²

Es werden meist von einem Ausgangsgut oder mehreren, die gemeinsam verarbeitet werden,
verschiedene Produkte produziert. In gewissen Produktionsprozessen können diverse
Kuppelprodukte entstehen, wie beispielsweise Dampf und Energie, die in nachfolgenden
Prozessen genutzt werden.¹⁷³

Eine Besonderheit der Prozessindustrie ist zu dem, dass sowohl Charakteristiken der Prozess-
und Fließfertigung (kontinuierlich) als auch der Chargen- und Kampagnenfertigung
(diskontinuierlich) zutreffend sind.¹⁷⁴ Die Charakteristiken sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Charakteristiken von Fertigungsarten in der Prozessindustrie¹⁷⁵

Prozess- und Fließfertigung	Chargen- und Kampagnenfertigung
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Produktionsgeschwindigkeit, kurze Durchlaufzeiten • Klare Kapazitätsbestimmungen, ein Ablauf für alle Produkte, keine Volumensflexibilität • Niedrige Produktkomplexität • Geringer Wertzuwachs • Hohe Auswirkung der Rüstzeit • Geringe Anzahl an Produktionsschritten • Geringe Anzahl an Produkten 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Durchlaufzeit, hohe Bestände • Kapazität ist nicht genau definiert (unterschiedliche Konfigurationen, komplexe Abläufe) • Komplexere Produkte • Hoher Wertzuwachs • Geringe Auswirkung der Rüstzeit • Hohe Anzahl an Produktionsschritten • Hohe Anzahl an Produkten

¹⁷⁰ Vgl. Lucas, K. (2007), S. 7

¹⁷¹ Vgl. Dyckhoff, H.; Spengler, T. (2007), S. 20

¹⁷² Vgl. Schönsleben, P. (2011), S. 405 ff.

¹⁷³ Vgl. Schönsleben, P. (2011), S. 405

¹⁷⁴ Vgl. Friemann, F. et al. (2015), S. 30

¹⁷⁵ Quelle: In Anlehnung an Fransoo, J. C.; Rutten, W. G. (1994), S. 53

Wenn Produkte kontinuierlich in einer Linienproduktion gefertigt werden, muss in der Planung und Steuerung auf das Anlagenlayout besonders Rücksicht genommen werden. Die hochvolumigen Produkte durchlaufen ganze Sequenzen von Arbeitsgängen hintereinander ohne Unterbrechung. Diese Zwischenprodukte nennt man Fließressourcen. Sie können während der Prozessphase nicht gespeichert werden und durchfließen den Prozess kontinuierlich in der Regel mit einer konstanten Durchsatzrate.¹⁷⁶ Dabei findet eine fortlaufende chemische Reaktion oder ein verfahrenstechnischer Prozess statt.¹⁷⁷ Eine Entkopplung durch Puffer ist unmöglich. Dafür muss ein reibungsloser Produktionsablauf und Transport zwischen den Produktionsstufen sichergestellt sein.¹⁷⁸

Bei der Chargenproduktion verläuft die Produktion diskontinuierlich. Dabei werden einzelne Prozessschritte zeitlich getrennt voneinander durchgeführt. Die gesamte Menge, welche in einem Produktionsschritt gefertigt wird, wird als Charge bezeichnet.¹⁷⁹ Diese Güter sind „[...] zum Zweck und aus der Sicht eines Herkunftsnachweises nicht voneinander unterscheidbar“.¹⁸⁰ Erst wenn alle Teile dieser Menge gefertigt sind, wird die Charge an die folgende Bearbeitungsstufe weitergegeben.¹⁸¹ Die Größe dieser Menge richtet sich meist nach der Mindestfüllmenge oder dem Fassungsvermögen der Aggregate. Umfasst die optimale Losgröße mehr als eine Charge werden diese zu einer Kampagne zusammengefasst. Die Kundenaufträge werden möglichst effizient und rüstopimal zu Chargen oder Kampagnen zusammengefasst um Zeit und Kosten bei Reinigungsprozessen, sowie An- und Abfahrtsvorgängen minimal zu halten.¹⁸² Dabei müssen die Lagerhaltungskosten berücksichtigt werden, da es bei der Kampagnenproduktion zwangsläufig zu Lagerbeständen kommt.¹⁸³

Zu dem charakterisiert sich die Prozessindustrie durch strenge ökologische Vorschriften, einen hohen Grad an Automation und teure Anlagen.¹⁸⁴ Die Anlagen und Aggregate sind meist speziell für die Prozesse entwickelt und gebaut. Trotz des Einsatzes von Mehrzweckanlagen, für eine flexiblere Anpassung der Kapazitäten an Belastungsstreuungen und leichteren Produktwechseln, ist man in der Prozessindustrie weit entfernt von einer flexiblen mechanischen Produktion.¹⁸⁵ Ein Auszug aus einer Studie, durchgeführt vom Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften der Montanuniversität Leoben, zeigt, dass viele Unternehmen in der Eisen- und Stahlindustrie (Eis) und der übrigen Metallindustrie (Met) vermehrt Mehrzweckanlagen einsetzen. Dabei befinden sich in ihren Produktionssystemen mehr diskrete bis hybride Produktionsprozesse. Dies ist in Abbildung 11 mit einem roten Quadrat gekennzeichnet. Unter hybriden Produktionsprozessen

¹⁷⁶ Vgl. Schönsleben, P. (2011), S. 409 f.

¹⁷⁷ Vgl. Günther, H.-O. (2004), S. 326

¹⁷⁸ Vgl. Neuhaus, U. (2008), S. 13

¹⁷⁹ Vgl. Schoner, P. (2007), S. 20

¹⁸⁰ Schönsleben, P. (2011), S. 218

¹⁸¹ Vgl. Schoner, P. (2007), S. 20

¹⁸² Vgl. Schönsleben, P. (2011), S. 419

¹⁸³ Vgl. Günther, H.-O. (2004), S. 329

¹⁸⁴ Vgl. Ashayeri, J. et al. (1996); zitiert nach Panwar, A. et al. (2015), S. 566

¹⁸⁵ Vgl. Schönsleben, P. (2011), S. 411

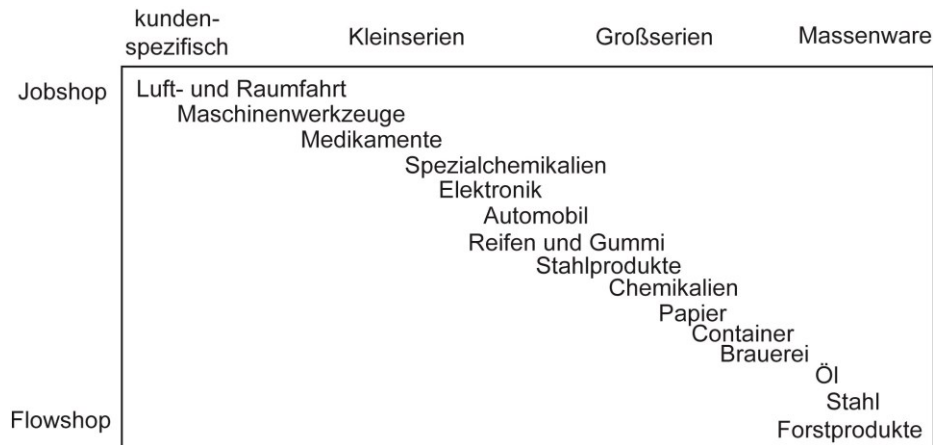


Abbildung 12: Taylor's Typologien¹⁹¹

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Kombination von diskreter und kontinuierlicher, divergenter und konvergenter Fertigung (siehe Abschnitt 3.3.2), Kampagnenplanung und Fließfertigung, sowie hohe Bestände, lange Durchlaufzeiten, großen Wertzuwachs und hohe Produktvielfalt mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten eine hoch komplexe Ausgangssituation für die Produktion in der Prozessindustrie darstellen.

3.3.2 Komplexität von Produktionssystemen der Prozessindustrie

Die Wertschöpfungskette in der Aluminiumindustrie als Beispiel der Prozessindustrie ist, wie in der Stahlindustrie, durch unterschiedliche Fertigungsverfahren gekennzeichnet. Dies ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Gießerei und die Warmphase sind der Prozessindustrie zuzuordnen, während das Kaltwalzen und die Adjustage dem Typus der Fertigungsindustrie entsprechen. Während der gesamten Kette sind verschiedene Produktionsstrukturen zu finden.¹⁹²

In der Gießerei herrscht eine konvergierende Produktionsstruktur vor. Aus mehreren Einsatzstoffen wie Primäraluminium, Schrottsorten und Legierungselementen wird der Walzbarren hergestellt. Dabei wird die Produktion in Chargen und Kampagnen geplant, die, aufgrund technologischer Restriktionen, Legierungskategorien oder Dimensionen erforderlich sind, um teure und zeitintensive Rüstvorgänge zu vermeiden bzw. die Kapazitäten und Ressourcen bestmöglich auszunutzen.¹⁹³

Im Warmwalzwerk ist die Produktionsstruktur divergierend. Dort werden aus einem Walzbarren Platten, Bleche oder Bänder (Coils) hergestellt. Vor dem Warmwalzwerk befindet sich ein Barrenlager, welches als Puffer dient und somit eine quantitative Flexibilität zulässt, um auf Schwankungen oder Veränderungen der Produktionsmengen und des Produktmixes reagieren zu können.¹⁹⁴

Das Kaltwalzwerk produziert in einer einfachen, kontinuierlichen Produktionsstruktur – aus einem Walzbarren entsteht ein Endprodukt. Nur bei der Herstellung von plattiertem Aluminiumhalbzeug

¹⁹¹ Quelle: In Anlehnung an Taylor, S. G. et al. (1981); zitiert nach Fransoo, J. C.; Rutten, W. G. (1994), S. 51

¹⁹² Vgl. Rainer, C.; Grubmüller, C. (2013), S. 23

¹⁹³ Vgl. Rainer, C.; Grubmüller, C. (2013), S. 23 f.

¹⁹⁴ Vgl. Rainer, C.; Grubmüller, C. (2013), S. 24

werden zwei Ausgangsprodukte benötigt. Ein Walzbarren als Kernmaterial und eine Plattierschablone werden zu einem plattierten Walzbarren vereint. Im Kaltwalzwerk werden kundenspezifische Dickenreduktionen, sowie Wärme- und Oberflächenbehandlungen durchgeführt. Dabei müssen neben zyklischen Materialflüssen auch unterschiedliche Glüh- und Wärmereihenfolgen Berücksichtigung finden.¹⁹⁵

Im letzten Bereich, der Adjustage, ist die Produktionsstruktur divergierend. Aus den Halbfertigprodukten werden kundenspezifische Endprodukte, wie Platten, Bleche, Tafeln, Streifen, besäumte Bänder etc. hergestellt.¹⁹⁶

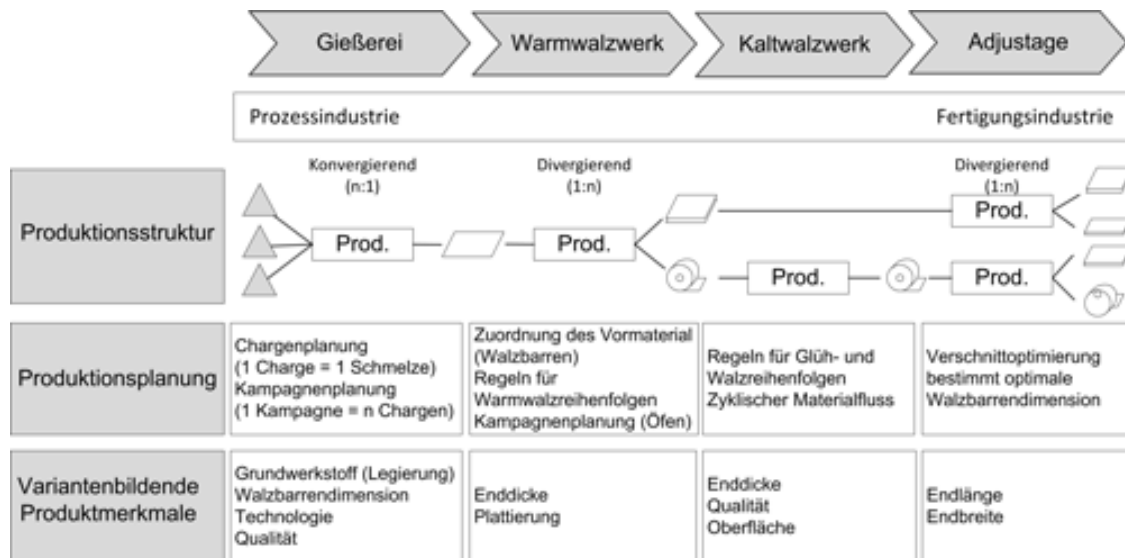


Abbildung 13: Wertschöpfungskette in der Aluminiumindustrie¹⁹⁷

Die Produktionsplanung in der Aluminium- und Stahlindustrie zeichnet sich allgemein durch die Chargen- und Kampagnenplanung aus. Dies ist einerseits durch technologische Vorgaben bedingt, die beispielsweise fixe Losgrößen fordern (z.B. Chargengröße des Ofens) oder andererseits aufgrund der hohen Rüstaufwände (z.B. spülen, säubern,...), die ein Zusammenfassen der Coils zu Fertigungskampagnen erforderlich machen.¹⁹⁸

Die Prozessstreuung macht die Prozesse ebenso komplex. In der Prozessindustrie bestimmt meist die Produktqualität die Dauer der Prozessschritte. Daher unterliegen die Fertigungsprozesse in den Produktionssystemen starken Streuungen.¹⁹⁹

Da die Produkte große Volumina und Größen aufweisen oder bestimmte Vorschriften für die Lagerung bestehen, tragen diese zur Komplexität der Produktionssysteme bei. Häufig kommen spezielle Lagervorrichtungen zum Einsatz, der Lagerplatz ist begrenzt oder Produkte dürfen nur bzw. müssen eine bestimmte Zeit gelagert werden.²⁰⁰

¹⁹⁵ Vgl. Rainer, C. (2013b), S. 36

¹⁹⁶ Vgl. Rainer, C. (2013b), S. 37

¹⁹⁷ Quelle: Rainer, C.; Grubmüller, C. (2013), S. 24

¹⁹⁸ Vgl. Deuse, J.; Deckert, C. (2006), S. 86

¹⁹⁹ Vgl. Schiefer, E. (2009), S. 38

²⁰⁰ Vgl. Schiefer, E. (2009), S. 39

3.4 Methoden für das operative Management

Um die Zielgrößen bzw. die Produktion zu verbessern wurden im Laufe der Zeit einige Methoden entwickelt, die sowohl die Produktionsabläufe verbessern, als auch die Optimierung der Anlagen betreffen. Im Folgenden werden einzelne beschrieben und erläutert, ob sie sich als Bestandteil des zu entwickelnden Wirkmodells eignen.

3.4.1 Lean Management

Durch das Buch „Die zweite Revolution der Automobilindustrie“, verfasst von den Wissenschaftlern WOMACK, JONES und ROOS²⁰¹, wurde „Lean Production“ zu einem Begriff im Produktionsmanagement, der ab diesem Zeitpunkt immer mehr an Bedeutung gewann. Weiter verbreitet und geprägt wurde dieser Begriff durch das Toyota Production System²⁰². Lean Production inkludiert die Effizienzsteigerung und die Qualitätssicherung in der Produktion. Heute umfasst der Begriff weit mehr als die Produktion und wurde zum Lean Management, welches die gesamte Organisation einschließt und sich zur Führungsphilosophie entwickelte. Im Mittelpunkt steht die Reduktion von Verschwendung, Fehlern und unnötigen Kosten mit dem Ziel höchste Qualität zu erreichen und schlanke Prozesse zu schaffen. Die Konzentration liegt auf den wertschöpfenden Aktivitäten. Alle Formen von Muda (japanisch: Verschwendung) bzw. alle nicht wertschöpfenden Tätigkeiten sollen eliminiert werden.²⁰³

Die Lean Philosophie lässt sich durch fünf Prinzipien beschreiben:²⁰⁴

1. **Beschreibung des Wertes eines Produktes oder einer Dienstleistung:** Wieviel das Produkt oder die Dienstleistung wert ist, bestimmt der Kunde. Deswegen ist es für Unternehmen wichtig die Anforderungen des Kunden und deren Wertschätzung von Produkten zu erreichen.
2. **Identifikation des Wertstroms:** Das Lean Management betrifft die gesamte Supply Chain, den gesamten Wertschöpfungsprozess und nicht nur die unternehmensinternen Prozesse.
3. **Flussprinzip:** Zwischen- und Endprodukte sollen im Prozess nicht gelagert werden. Der Wertschöpfungsprozess soll kontinuierlich sein und nicht durch Liegezeiten unterbrochen werden.
4. **Pull-Prinzip:** Nicht der Planungsprozess löst den Wertstrom aus, sondern der Bedarf oder die Nachfrage des Kunden. Erst wenn die Produkte angefordert werden wird produziert.
5. **Streben nach Perfektion:** Die Verbesserung ist nie zu Ende. Auch die Einführung vom Pull- oder Fluss-Prinzip kann immer weiter verbessert werden. Der Drang Verbesserungen umzusetzen wird durch das Streben nach Perfektion generiert.

²⁰¹ Siehe Womack, J. P. et al. (1994)

²⁰² Siehe Ohno, T. (2013)

²⁰³ Vgl. Brunner, F. J. (2008), S. 57 ff.; Graf, G. (1996), S. 2 ff.

²⁰⁴ Vgl. Gorecki, P.; Pautsch, P. (2014), S. 27

Lean-Management lässt sich sehr gut beispielsweise in der Stückgutproduktion und Fließfertigung anwenden. Dies kommt aus der Automobilindustrie. Durch dessen Einsatz können große Verbesserungen erreicht werden.

In der Prozessindustrie ist dieser Ansatz schwer umsetzbar. PANWAR et al. fassen in einem Literaturreview zusammen, dass Lean-Methoden, die nicht von den Prozesscharakteristiken abhängen, wie 5S²⁰⁵, Qualitätsmanagementprogramme, Value Stream Mapping²⁰⁶, Arbeitsstandards und teambasierte Problemlösungen in der Prozessindustrie anwendbar sind. Jedoch Lean-Techniken wie das automatische Stoppen der Linie, Inselfertigung oder focused factory²⁰⁷ können nicht eingesetzt werden. Vor allem durch die Chargenbildung, zeitintensive Rüstvorgänge und technologisch bedingte Wartezeiten ist ein kontinuierlicher Fertigungsprozess ohne Liege- und Wartezeiten nicht möglich. Just in Time, das Pull-Prinzip und Kanban können begrenzt eingesetzt werden.²⁰⁸

3.4.2 Kaizen und KVP

Kaizen kommt aus Japan und bedeutet Veränderung zum Guten. Im Deutschen wird es oft mit KVP, dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess gleich gesetzt. KVP ist keine Methode, die ein paar Mal angewendet wird, sondern vielmehr eine prozessorientierte Denk- und Verhaltensweise. In kleinen Schritten unter Einbeziehung der Mitarbeiter werden Vorgänge und Prozesse verbessert und die optimierten Prozesse zu Standards gemacht. Dies verdeutlicht die Abbildung 14. Dabei werden Ziele wie die Vermeidung von Verschwendung, die Optimierung von Qualität, Kosten, Zeit und Umwelt und die Verbesserung von Arbeitsabläufen angestrebt.²⁰⁹ Ein Hilfsmittel im KVP ist der PDCA-Zyklus. Er setzt sich aus den vier Phasen (1) Plan, (2) Do, (3) Check, (4) Act zusammen, welche in Tabelle 5 genauer beschrieben sind.²¹⁰

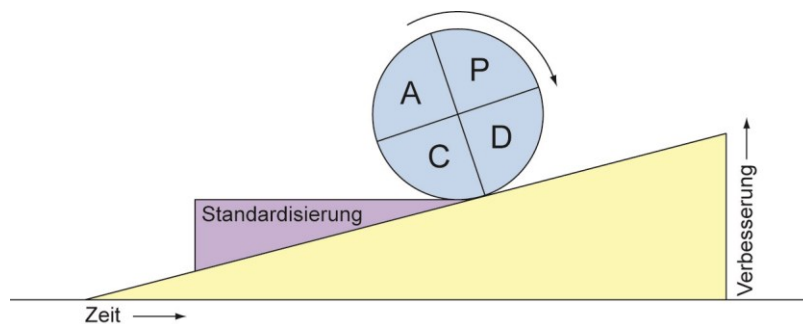


Abbildung 14: KVP

Im Mittelpunkt stehen die Mitarbeiter und die Kunden. Von den Mitarbeitern sollen die Verbesserungen ausgehen, die immer am Kunden ausgerichtet sind. Kunden können interne oder externe Kunden sein. Somit ist Kaizen immer kundenorientiert und nicht für rein interne Belange.²¹¹

²⁰⁵ Für weitere Ausführungen siehe Teeuwen, B.; Schaller, C. (2011)

²⁰⁶ Für weitere Ausführungen siehe Klevers, T. (2007); Knöschl, T. (2014)

²⁰⁷ Für weitere Ausführungen siehe Skinner, W. (1974)

²⁰⁸ Vgl. Panwar, A. et al. (2015), S. 582

²⁰⁹ Vgl. Brunner, F. J. (2008), S. 11 ff.; Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P. (2012), S. 38 f.

²¹⁰ Vgl. Reitz, A. (2008), S. 33 ff.

²¹¹ Vgl. Gorecki, P.; Pautsch, P. (2014), S. 192

Tabelle 5: PDCA-Zyklus²¹²

Phase	Beschreibung
Plan	Problembeschreibung, Zielsetzung und Zielvereinbarung, Ursachenanalyse, Planung und Konzeption von Lösungsansätzen
Do	Umsetzung konkreter Maßnahmen zur Lösung des Problems
Check	Bewertung der Ergebnisse und Zielkontrolle
Act	Verbesserung des Vorgehens, der Situation etc.; Standardisierung erfolgreicher Vorgehensweisen

KVP und Kaizen sind nicht nur in bestimmten Branchen oder bei bestimmten Fertigungstypen einsetzbar. Deswegen können sie in der Prozessindustrie angewendet werden.²¹³ Für die Aufgabenstellung in dieser Arbeit sind diese Methoden allerdings nicht ausreichend, bzw. zu allgemein. KVP und Kaizen sind keine Methoden, welche das Bestandsniveau in Prozessen festlegen. Allerdings kann nach dem PDCA-Zyklus vorgegangen werden um das Modell zu entwickeln (siehe Abschnitt 6.3).

3.4.3 Theory of Constraints

In den späten 1970ern hat GOLDRATT, der Erfinder der Theory of Constraints (TOC), eine revolutionäre Methode für die Produktionsplanung entwickelt, welche in starkem Kontrast zu Methoden wie beispielsweise MRP steht.²¹⁴ TOC ist eine Philosophie zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit eines Systems. Ausgehend von der Systemdynamik werden die Zusammenhänge der Prozesse berücksichtigt und als Kette gesehen. Die Kette ist so gut wie ihr schwächstes Glied. Dies gilt auch für die Produktionskette in einem Unternehmen. In dieser Theorie liegt der Fokus am Engpass. Allerdings ist nicht das Eliminieren des Engpasses vordergründig, sondern die maximale Ausnutzung.²¹⁵ Erst zuletzt soll der Engpass beseitigt werden. Hierzu wurden fünf Schritte entwickelt:²¹⁶

1. **Identifiziere den Engpass:** In jedem Prozess gibt es genau einen Engpass. Der Engpass ist jener Prozessschritt, der den gesamten Prozess limitiert und dessen Leistung vorgibt. Meist ist es der Schritt mit der geringsten Kapazität (maschinell oder personell bedingt).
2. **Nutze den Engpass voll aus:** Da der Engpass die Leistung des Prozesses vorgibt, muss dieser bestmöglich ausgelastet werden.
3. **Ordne alles der Auslastungsentscheidung unter:** Alle Unterstützungsprozesse sollen am Engpass ausgerichtet sein, um diesen zu unterstützen und eine volle Auslastung zu ermöglichen.
4. **Behebe den Engpass:** Erst wenn die ersten drei Schritte ausgeführt sind, soll versucht werden den Engpass zu beheben. Ist dies geschehen, tritt ein neuer Engpass auf.

²¹² Quelle: In Anlehnung an Reitz, A. (2008), S. 34 f.

²¹³ Vgl. Panwar, A. et al. (2015), S. 582

²¹⁴ Vgl. Balderstone, S. J.; Mabin, V. J. (1998), S. 205

²¹⁵ Vgl. Dettmer, H. W. (1997), S. 7 ff.; Gupta, M. C.; Boyd, L. H. (2008), S. 993

²¹⁶ Vgl. Barnard, A. (2010), S. 419 f.

5. **Beginne bei Schritt 1:** Da es immer einen Engpass in einer Prozesskette gibt, fängt der Kreislauf von vorne an.

Die TOC ist in der Literatur oft diskutiert. Die Entwicklung dieser ist nicht vollständig dokumentiert und wissenschaftlich festgehalten. Zum Beispiel hat GOLDRATT seine Erfahrungen in einem Roman, dem Bestseller „Das Ziel“²¹⁷ festgehalten und erzählt. Jedoch haben BALDERSTONE und MABIN in einer Studie aufgezeigt, dass durch die Anwendung von TOC Verbesserungen erzielt wurden.²¹⁸

Ein Fallbeispiel von BELVEDERE und GRANDO²¹⁹ zeigt, dass die TOC in der Prozessindustrie angewandt werden kann. Da aber nicht der Engpass im Fokus dieser Arbeit steht, sondern die Definition des idealen Bestandes in Verbindung mit der Anlagenauslastung, ist die TOC zur Lösung der Forschungsfrage nicht hilfreich.

3.4.4 Total Productive Maintenance

Die Verbesserung der Produktionsprozesse schließt die Betrachtung der Anlage mit ein. Total Productive Maintenance (TPM) stellt die Anlageneffektivität in den Mittelpunkt. Dieses Konzept fordert eine störungslose, effiziente Nutzung von Produktionsanlagen.²²⁰ Es kommt aus dem Japanischen und kombiniert das Total Quality Management (TQM) mit Total Employee Involvement (TEI), welches die Mitarbeiter komplett miteinbezieht. Somit stehen die Mitarbeiter im Zentrum dieses Ansatzes.²²¹

„TPM bewirkt die Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades und der Arbeitsproduktivität, die Reduzierung von Nacharbeit, Ausschuß und Instandhaltungskosten sowie die Erhöhung der Arbeitssicherheit und Umlaufgeschwindigkeit und die Vermehrung der Verbesserungsvorschläge.“²²²

In Anbetracht der Ziele ungeplante Stillstände der Betriebsanlagen vollständig zu vermeiden, von den Anlagen verursachte Defekt zu eliminieren und keine Geschwindigkeitsverluste einzufahren²²³, inkludiert die Definition von TPM fünf Punkte:²²⁴

1. Die Anlageneffektivität soll maximiert werden.
2. Für jede Anlage wird ein durchgehendes System der produktiven Instandhaltung etabliert.
3. Verschiedene Bereiche führen TPM durch (Ingenieurwesen, Anlagenbetreiber, Instandhaltung).
4. Alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, vom Top-Management bis zur operativen Ebene, sind in TPM involviert.
5. Die Basis von TPM ist die durch Motivationsmanagement geförderte Productive Maintenance (durch beispielsweise autonome Kleingruppen-Aktivitäten).

²¹⁷ Siehe Goldratt, E. M.; Cox, J. (2002)

²¹⁸ Vgl. Balderstone, S. J.; Mabin, V. J. (1998), S. 210 f.

²¹⁹ Vgl. Belvedere, V.; Grando, A. (2005), S. 10 f.

²²⁰ Vgl. Al-Radhi, M. (2002), S. 5

²²¹ Vgl. Schmidt, S. (1995), S. 8

²²² Schmidt, S. (1995), S. 8

²²³ Vgl. Hartmann, E. H. (2007), S. 42

²²⁴ Vgl. Nakajima, S. (1995), S. 31

Weil das Ziel von TPM eine hohe Anlageneffektivität ist und dies Teil der Aufgabenstellung ist, kann TPM zur Lösung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Problematik beitragen. Jedoch kann für das vorerst geforderte Wirkmodell, welches die Auswirkungen von Veränderungen der Anlageneffektivität auf den Bestand darstellen soll, nicht das gesamte Konzept verwendet werden; eine Kennzahl daraus, welche im Anschluss erläutert wird, sehr wohl. TPM wird in weiterer Folge bei den Normstrategien in Abschnitt 5.3.2 zum Einsatz kommen.

3.5 Gesamtanlageneffektivität

Die Gesamtanlageneffektivität bzw. Overall Equipment Effectiveness (OEE), ist eine Kennzahl aus dem Anlagenmanagement. Sie wurde von NAKAJIMA und dem Japan Institute for Plant Maintenance (JIPM) im Rahmen des Verbesserungsansatzes Total Productive Maintenance (TPM) entwickelt. Dadurch werden Verluste identifiziert und durch zielgerichtete Optimierungsansätze reduziert.²²⁵

Die OEE berechnet sich aus dem Produkt von Verfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsrate:²²⁶

$$OEE = \text{Verfügbarkeit} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsrate} \quad (3.1)$$

In diese Faktoren fließen sechs Verlustquellen ein:²²⁷

- Anlagenausfall durch Störungen
- Rüsten und Einstellen
- Leerlauf und Kurzstillstände
- Verringerte Geschwindigkeit
- Qualitätsmängel
- Anlaufverluste

Die Berechnung des OEE-Wertes geht von der maximal verfügbaren Zeit aus. Diese wird durch Verluste durch Ausfallzeiten und Störungen reduziert und ergibt die Betriebszeit in welcher die Maschine läuft. Durch Geschwindigkeitsverluste wird die Betriebszeit wiederum verringert und wird zur Netto-Betriebszeit. Wenn danach die Verluste durch Fehler abgezogen werden, bleibt die wertschöpfende Betriebszeit übrig, welche es zu maximieren gilt.²²⁸ Abbildung 15 bildet dies ab.

- In die Verluste durch Ausfallzeiten wirken Störungen, die einen Anlagenausfall verursachen, Rüsten und Einstellen ein. Diese Verlustquellen beeinflussen die **Verfügbarkeit**.
- Geschwindigkeitsverluste werden durch Leerlauf, Kurzstillstände und verringerte Geschwindigkeit verursacht, welche den **Leistungsgrad** herab setzen.
- Die **Qualitätsrate** nimmt durch Qualitätsmängel und Anlaufverluste, die in den Verlusten durch Fehler zusammengefasst sind, ab.

²²⁵ Vgl. May, C.; Koch, A. (2008), S. 245

²²⁶ Vgl. Nakajima, S. (1995), S. 48

²²⁷ Vgl. Al-Radhi, M. (2002), S. 16

²²⁸ Vgl. Nakajima, S. (1995), S. 43

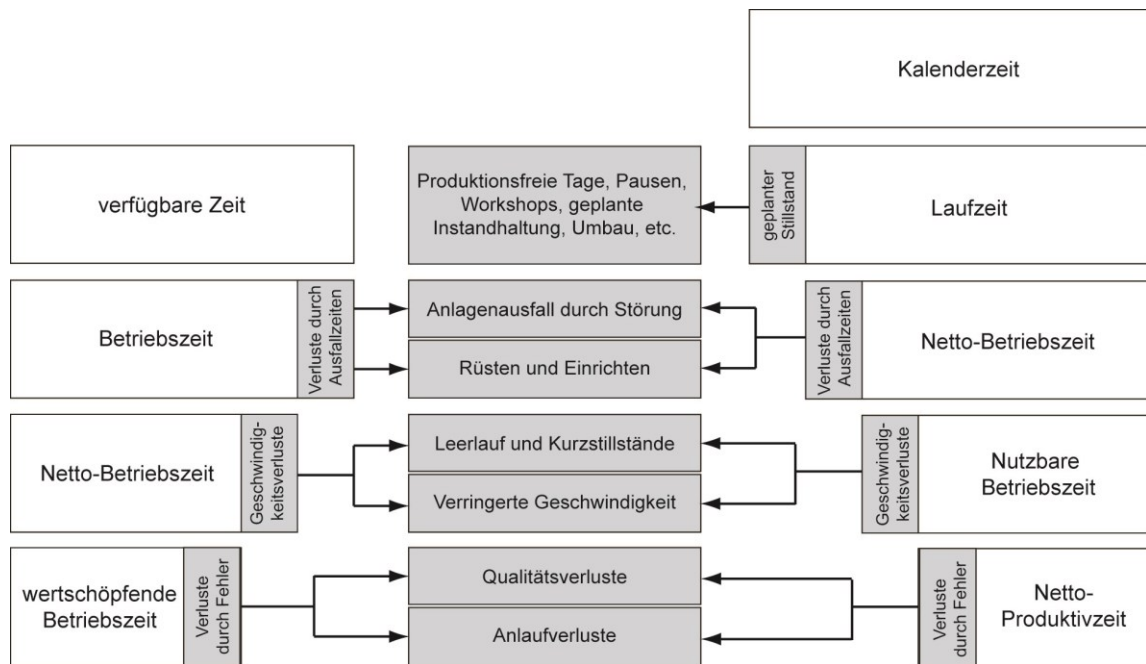


Abbildung 15: Zusammensetzung OEE²²⁹

Die Nomenklatur ist nicht in allen Quellen gleich. In manchen Fällen wird die Betriebszeit mit der Nettobetriebszeit getauscht und zur nutzbaren Betriebszeit. Dies ist in Abbildung 15 verdeutlicht.

Ebenso gibt es bei der Berechnung unterschiedliche Herangehensweisen. Einerseits können die Verluste in Zeiteinheiten angegeben werden oder andererseits in Stück. Es ist anzumerken, dass es bei letzterem zu Unschärfen kommen kann. Beispielsweise bei der Berechnung der Qualitätsrate in Stück wird nicht berücksichtigt, dass verschiedene Produkte unterschiedliche Produktionszeiten haben. Dies würde bei einer Berechnung in Zeiteinheiten einfließen.

In Tabelle 6 sind die Formeln der Faktoren zur Berechnung der OEE abgebildet. In der linken Spalte beziehen sich die Einheiten auf Stück, in der rechten auf Zeit.

²²⁹ Quelle: In Anlehnung an Hartmann, E. H. (2007), S. 68; Nakajima, S. (1995), S. 43

Tabelle 6: Berechnung Faktoren für OEE

Verfügbarkeit	$\frac{\text{verfügbare Zeit} - \text{Ausfallzeit}}{\text{verfügbare Zeit}} \quad (3.2)$	$\frac{\text{Nettobetriebszeit}}{\text{Laufzeit}} \quad (3.3)$
Leistungsgrad	$\frac{\text{geplante Taktzeit} * \text{Output}}{\text{Betriebszeit}} \quad (3.4)$	$\frac{\text{nutzbare Betriebszeit}}{\text{Nettobetriebszeit}} \quad (3.5)$
	$\frac{\text{Ist} - \text{Leistung}}{\text{Soll} - \text{Leistung}} \quad (3.6)$	
Qualitätsrate	$\frac{\text{Output} - \text{Ausschuss} - \text{Nacharbeitsmenge}}{\text{Output}} \quad (3.7)$	$\frac{\text{Nettoproduktivzeit}}{\text{nutzbare Betriebszeit}} \quad (3.8)$

Durch die OEE sind die Einflussgrößen Zeit, Geschwindigkeit und Qualität des Anlagenbetriebes durch einen Wert ausgedrückt, der anzeigt, wie die Wertschöpfung durch diese drei Einflussgrößen gesteigert werden kann. Das Ziel liegt darin, durch die Reduzierung der Verluste (Fehler, Geschwindigkeit, Ausfallzeiten) die wertschöpfende Betriebszeit einer Anlage zu maximieren.²³⁰

Totale effektive Anlagenproduktivität und Netto-Anlageneffektivität

Neben der Gesamtanlageneffektivität gibt es die totale effektive Anlagenproduktivität (Total Effective Equipment Productivity, TEEP) und die Netto-Anlageneffektivität (Net Equipment Effectiveness, NEE). Die TEEP ist eine Kennzahl für die wirkliche Produktivität einer Anlage. Sie umschließt die Anlagenauslastung und die Gesamtanlageneffektivität und berücksichtigt die geplanten Stillstandszeiten:²³¹

$$TEEP = \text{Nutzungsgrad der Anlage} * OEE \quad (3.9)$$

$$TEEP = \text{Nutzungsgrad} * \text{Verfügbarkeit} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsrate} \quad (3.10)$$

Der Nutzungsgrad berechnet sich wie folgt:²³²

$$\text{Nutzungsgrad} = \frac{\text{gesamte Verfügbarkeit} - \text{geplante Stillstandszeit}}{\text{gesamte Verfügbarkeit}} \quad (3.11)$$

Die Netto-Anlageneffektivität schließt zusätzlich zur geplanten Stillstandszeit die Einricht- und Umrüstzeit aus. Sie gibt den wirklichen mechanischen Zustand der Anlage wieder und ist das Produkt aus der Zeit der Betriebsbereitschaft, des Leistungsgrades und der Qualitätsrate:²³³

$$NEE = \text{Zeit der Betriebsbereitschaft} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsrate} \quad (3.12)$$

²³⁰ Vgl. Nakajima, S. (1995), S. 44

²³¹ Vgl. Hartmann, E. H. (2007), S. 61 ff.

²³² Vgl. Hartmann, E. H. (2007), S. 69

²³³ Vgl. Hartmann, E. H. (2007), S. 63 ff.

Die Gesamtanlageneffektivität eignet sich um im Modell den Teil der Anlage zu analysieren. Als Kennzahl lässt sie sich gut in ein Modell integrieren bzw. mit einem Modell kombinieren. Des Weiteren gibt sie durch die drei Faktoren Verfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsgrad detailliert Aufschluss über Verluste und in welchen Bereichen Verbesserungen angestrebt werden sollten. Allerdings fehlt der Bereich der Bestandsanalyse. Um herauszufinden, welche Kennzahlen oder Modelle sich dafür eignen, werden im nächsten Abschnitt die logistischen Zielgrößen erläutert.

3.6 Logistische Zielgrößen

In diesem Abschnitt werden die für weitere Ausführungen benötigten Kennzahlen und Größen beschrieben. Dafür werden zuerst die zentralen Größen Auftrags-, Durchführungs- und Durchlaufzeit angeführt, die für das Verständnis des Trichtermodells und des Durchlaufdiagramms notwendig sind. Anhand dieser Modelle werden weitere Kenngrößen erläutert.

3.6.1 Auftragszeit und Durchführungszeit

Die Auftragszeit ist jene Zeitspanne, die für die Ausführung eines Arbeitsvorganges vorgegeben wird. Sie wird in Vorgabestunden angegeben und umfasst die Einzelzeit je Mengeneinheit und die Rüstzeit.²³⁴

$$ZAU = \frac{(x * t_e + t_r)}{60} \quad (3.13)$$

mit

ZAU Auftragszeit eines Arbeitsvorganges (in Vorgabestunden) [Std]

x Losgröße [ME]

t_e Einzelzeit (Vorgabezeit) je Mengeneinheit [min/ME]

t_r Rüstzeit je Los (Vorgabezeit) [min]

Der Mittelwert der Auftragszeit ergibt sich zu:²³⁵

$$ZAU_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{n} \quad (3.14)$$

mit

ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit [Std]

ZAU_i Individuelle Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

²³⁴ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 17 f.

²³⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 18

Zur Beschreibung der Streubreite einer Verteilung wird die Standardabweichung berechnet:²³⁶

$$ZAU_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_m - ZAU_i)^2}{n}} \quad (3.15)$$

mit

- ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit [Std]
- ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit [Std]
- ZAU_i Individuelle Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]
- n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

Die Standardabweichung im Verhältnis zum arithmetischen Mittel beschreibt der Variationskoeffizient. Mittels diesem kann die Variabilität von verschiedenen Verteilungen verglichen werden:²³⁷

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (3.16)$$

mit

- ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
- ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit [Std]
- ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit [Std]

Prinzipiell wird die Ausführungszeit in Vorgabestunden angegeben. Bei bestimmten Fragestellungen kann eine Angabe in Betriebskalendertagen erforderlich sein, dann wird diese Kennzahl Durchführungszeit genannt, welche sich wie folgt berechnet:²³⁸

$$ZDF = \frac{ZAU}{L_{max}} \quad (3.17)$$

mit

- ZDF Durchführungszeit (Arbeitsvorgang) [BKT]
- ZAU Auftragszeit [Std]
- L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Die maximal mögliche Leistung ergibt sich aus der Kapazität, welche entweder vom Personal oder dem Betriebsmittel begrenzt wird. Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Szenarien die geplante Kapazität vermindern. So reduzieren beispielsweise Maschinenstörungen und ungeplante Ausfälle die Anlagenkapazität oder ablaufbedingte Unterbrechungen können die persönliche Arbeitszeit verringern.²³⁹

²³⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 19

²³⁷ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 19

²³⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 19 f.

²³⁹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 20

Wird ein Arbeitssystem betrachtet und die maximal mögliche Leistung ist konstant bzw. nicht abhängig von der Auftragszeit der einzelnen Arbeitsvorgänge, ist der Variationskoeffizient der Auftragszeit gleich jener der Durchführungszeit:²⁴⁰

$$ZAU_v = ZDF_v \quad (3.18)$$

mit

ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

ZDF_v Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Es gelten die Gleichungen für den Mittelwert, die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten der Auftragszeit (3.14, (3.15), (3.16)) analog für die Durchführungszeit.²⁴¹

3.6.2 Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit im weiteren Sinn ist die Zeitspanne von der Auftragsfreigabe bis zur vollständigen Beendigung des Auftrages inklusive Auslieferung. Die Durchlaufzeit im engeren Sinn bezieht sich auf einen Produktionsauftrag und umfasst somit die Dauer vom Einstoßzeitpunkt des Auftrages beim ersten Arbeitsvorgang bis zum Bearbeitungsende beim letzten Vorgang.²⁴²

$$ZDL = TBE - TBEV \quad (3.19)$$

mit

ZDL Durchlaufzeit [BKT]

TBE Termin Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges [BKT]

$TBEV$ Termin Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges [BKT]

In weiterer Folge bezieht sich der Begriff Durchlaufzeit auf die Durchlaufzeit im engeren Sinn.

Jeder Arbeitsvorgang kann in fünf Bestandteile eingeteilt werden, die zusammen die Durchlaufzeit ergeben:²⁴³

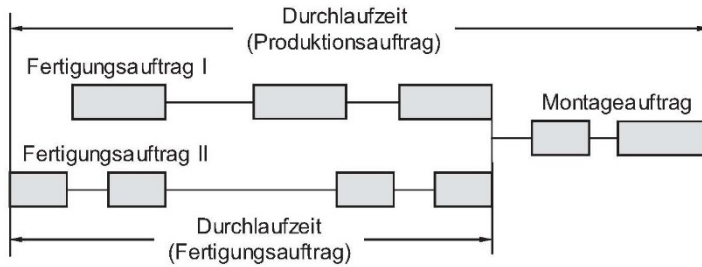
- Liegen nach Bearbeitung
- Transportieren
- Liegen vor Bearbeitung
- Rüsten
- Bearbeiten

²⁴⁰ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 21

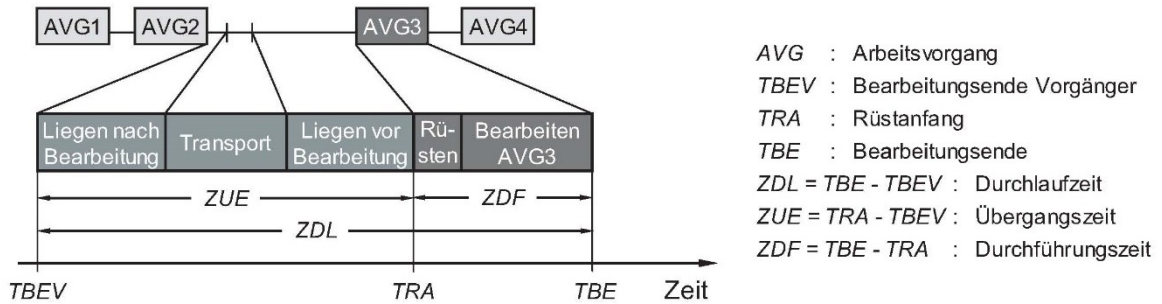
²⁴¹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 21

²⁴² Vgl. Heiserich, O.-E. (2000), S. 28

²⁴³ Vgl. Wiendahl, H.-P. (1987), S. 51



a) Durchlaufplan eines Produktionsauftrages



b) arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement

© IFA G1.878Bs

Abbildung 16: a) Durchlaufplan eines Produktionsauftrages, b) arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement²⁴⁴

In Abbildung 16 ist die Zusammensetzung der Durchlaufzeit anhand eines Beispiels dargestellt. Setzt sich ein Auftrag aus zwei Fertigungsaufträgen und einem Montageauftrag zusammen, so umfasst die Durchlaufzeit die gesamte Dauer vom Beginn des früheren Fertigungsauftrags bis zur Beendigung des Montageauftrags. Somit sind alle Liege-, Warte-, Transport- und Rüstzeiten, die in dieser Zeitspanne anfallen, in der Durchlaufzeit inkludiert. Dies zeigt der untere Teil der Abbildung 16. Das Liegen nach Bearbeitung, der Transport und das Liegen vor Bearbeitung gehören zum betrachteten Arbeitsvorgang und wird unter dem Begriff Übergangszeit zusammengefasst. Das Rüsten und Bearbeiten gehören zur Durchführungszeit und bilden die zweite Komponente der Durchlaufzeit.²⁴⁵ Somit ergibt sich:²⁴⁶

$$ZUE = ZDL - ZDF \quad (3.20)$$

Das arithmetische Mittel ergibt sich zu:²⁴⁷

$$ZDL_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZDL_i}{n} \quad (3.21)$$

²⁴⁴ Quelle: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 23; zitiert nach Busse, T. D. (2013a), S. 13

²⁴⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 21 f.

²⁴⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 23

²⁴⁷ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 23

mit

ZDL_m Mittlere Durchlaufzeit [BKT]

ZDL_i Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges [BKT]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

Das Verhältnis zwischen Durchlaufzeit und Durchführungszeit, der Flussgrad, ist ein relatives Maß und eignet sich um Unternehmen miteinander zu vergleichen.²⁴⁸

$$FG_m = \frac{ZDL_m}{ZDF_m} \quad (3.22)$$

mit

FG_m Mittlerer Flussgrad [-]

ZDL_m Mittlere Durchlaufzeit [BKT]

ZDF_m Mittlere Durchführungszeit [BKT]

Die Durchlaufzeit ist eine der wichtigsten Kenngrößen in der Produktion. Denn lange Durchlaufzeiten wirken sich negativ auf die Kapitalbindungskosten, das Umlaufvermögen und die Wettbewerbssituation aus.²⁴⁹

3.7 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Die Abarbeitung der Aufträge an einer Anlage wird durch das von KNETTER und BECHTE entwickelte Trichtermodell (siehe Abbildung 17a) dargestellt. Es geht davon aus, dass jede Kapazitätseinheit durch Bestand, Zugang und Abgang in seinem Durchlaufverhalten beschrieben werden kann. Eine Kapazitätseinheit kann ein Einzelarbeitsplatz, eine Kostenstelle oder eine gesamte Fertigungseinheit sein. Die ankommenden Lose und die im Trichter auf die Abarbeitung wartenden Lose bilden den Bestand in Vorgabestunden. Nach der Bearbeitung fließen diese aus dem Trichter ab, wobei die Trichteröffnung die Leistung versinnbildlicht. Der Durchmesser der Öffnung gibt die Kapazitätsgrenze vor.²⁵⁰ Zu- und Abgang müssen aufeinander abgestimmt sein, sodass der gewünschte Bestandslevel gehalten werden kann.²⁵¹

Die Ergebnisse des Trichtermodells können mittels Durchlaufdiagramms dargestellt werden (siehe Abbildung 17b). Dabei werden die zugehenden Aufträge gemäß Ankunftsdatum mit ihrem Arbeitsinhalt kumulativ aufgetragen, was die Zugangskurve darstellt. Die Höhe des Beginns der Zugangskurve wird durch den Bestand, der sich im Arbeitssystem befindet, vorgegeben; dem Anfangsbestand. Bei der Abgangskurve werden die Arbeitsinhalte der abgearbeiteten Aufträge nach ihrem Abarbeitungsdatum kumulativ aufgetragen. Der vertikale Abstand zwischen Zugangs-

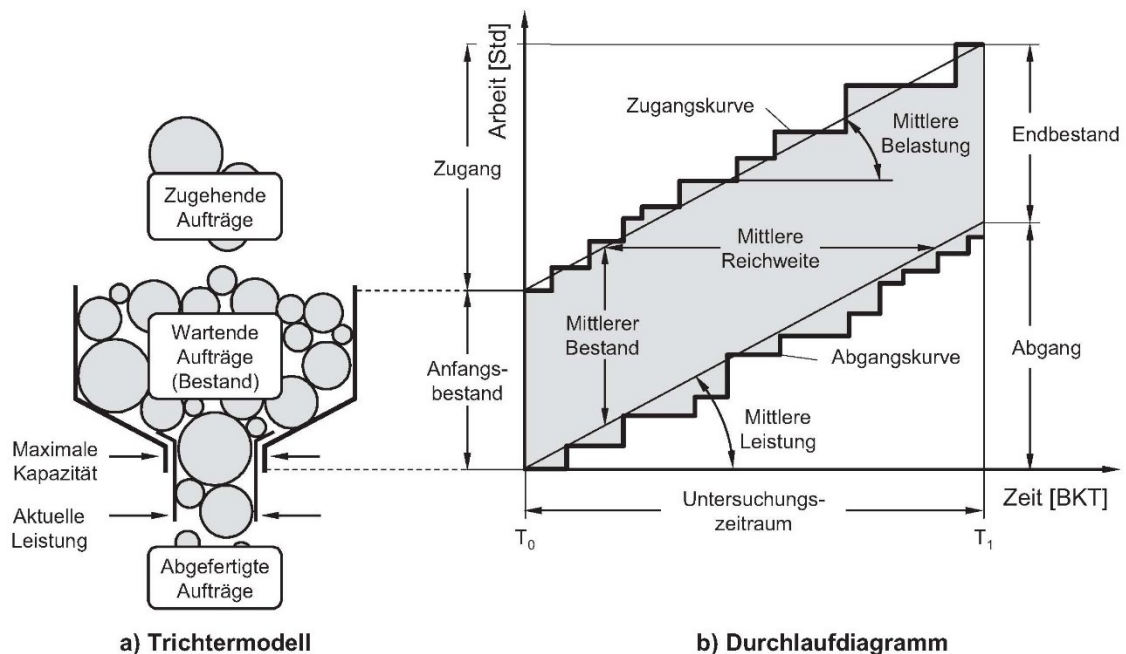
²⁴⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 23

²⁴⁹ Vgl. Bauer, J.; Hayessen, E. (2009), S. 77

²⁵⁰ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 25

²⁵¹ Vgl. Erdlenbruch, B. (1991), S. 196

und Abgangskurve am Ende des Untersuchungszeitraums ist der Endbestand. Die mittlere Belastung wird durch die mittlere Steigung der Zugangskurve dargestellt und die mittlere Steigung der Abgangskurve ist die mittlere Leistung.²⁵²



© IFA 0.476Bs

Abbildung 17: a) Trichtermodell, b) Durchlaufdiagramm²⁵³

3.7.1 Leistung und Auslastung

Der Quotient aus geleisteter Arbeit und Bezugszeitraum P ergibt die mittlere Leistung L_m , wobei sich die geleistete Arbeit durch die Summe der im Zeitraum zurückgemeldeten Arbeitsinhalte berechnet:²⁵⁴

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{P} \quad (3.23)$$

mit

- L_m Mittlere Leistung [Std/BKT]
- ZAU_i Auftragszeit (in Vorgabestunden) je Arbeitsvorgang [Std]
- n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]
- P Länge des Bezugszeitraums [BKT]

Die Auslastung ergibt sich durch das Verhältnis der mittleren Leistung zur maximal möglichen Leistung:²⁵⁵

²⁵² Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 25 f.

²⁵³ Quelle: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 25; zitiert nach Busse, T. D. (2013a), S. 15

²⁵⁴ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 26

²⁵⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 27

$$A_m = \frac{L_m}{L_{max}} * 100 \quad (3.24)$$

mit

- A_m Mittlere Auslastung [%]
- L_m Mittlere Leistung [Std/BKT]
- L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

3.7.2 Bestand und Reichweite

Der vertikale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve zum ausgewählten Zeitpunkt entspricht den auf die Bearbeitung wartenden Aufträgen, dem Bestand. Der mittlere Bestand ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Bestandsfläche FB (grau gefärbte Fläche in Abbildung 17) und dem Bezugszeitraum P. Die Bestandsfläche berechnet sich aus der Differenz der Flächen unter den beiden Kurven. Werden die Bestände zu diskreten Zeitpunkten im Untersuchungszeitraum gemessen, beispielsweise am Ende eines Arbeitstages oder einer Schicht, wird der Bestand über die Summe der Einzelbestände pro Zeitabschnitt dividiert durch die Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum, berechnet:²⁵⁶

$$B_m = \frac{\int_{T_0}^{T_1} ZU(t)dt - \int_{T_0}^{T_1} AB(t)dt}{T_1 - T_0} = \frac{\sum_{T=T_0}^{T_1} B(t)}{z} \quad (3.25)$$

mit

- B_m Mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]
- ZU(t) Zugang (kumulierter Arbeitsinhalt der zugehenden Arbeitsvorgänge über Zeit) [Std]
- AB(t) Abgang (kumulierter Arbeitsinhalt der abgehenden Arbeitsvorgänge über Zeit) [Std]
- T₀ Beginn des Bezugszeitraums
- T₁ Ende des Bezugszeitraums
- B(t) Bestand im Zeitabschnitt t [Std]
- z Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum [-]

Wird der mittlere Bestand durch die mittlere Leistung gekürzt, bekommt man die mittlere Reichweite. Dies wird als **Trichterformel** bezeichnet:²⁵⁷

$$R_m = \frac{FB}{AB} = \frac{B_m}{L_m} \quad (3.26)$$

mit

- R_m Mittlere Reichweite des Bestandes [BKT]
- FB Bestandsfläche [Std · BKT]
- AB Abgang im Bezugszeitraum [Std]

²⁵⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 27 f.

²⁵⁷ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 28

B_m	Mittlerer Bestand [Std]
L_m	Mittlere Leistung [Std/BKT]

Die Reichweite ist jene Dauer, die eine Anlage mit dem wartenden Bestand produzieren kann, wenn kein Nachschub angeliefert wird. Im Durchlaufdiagramm entspricht dies dem horizontalen Abstand der Zugangs- und Abgangskurve.

3.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die erste Teilfrage, welche die Besonderheiten der Prozessindustrie betrifft, geklärt. Divergente und konvergierende Produktionsstrukturen, große Arbeitslose und hochvolumige Linienproduktion sind Besonderheiten einer Produktion in der Prozessindustrie. Bei der Planung und Steuerung muss auf das Anlagenlayout und auf kontinuierliche Prozessflüsse Rücksicht genommen werden. Diese Punkte machen die Produktion in der Prozessindustrie sehr komplex. Hinzu kommt, dass die, in den meisten Fällen eigens für die Prozesse entwickelten Anlagen, sehr speziell und wenig flexibel einsetzbar sind. Dies verleiht der Anlagenauslastung einen hohen Stellenwert. Um in der anlagenintensiven Prozessindustrie die Anforderungen vom Markt an Flexibilität und Variantenvielfalt bestehen zu können, müssen Unternehmen die Produktion effizient gestalten. Methoden wie Lean Management, KVP, Kaizen, TOC oder TPM können dabei helfen, sind jedoch eingeschränkt einsetzbar. Sie setzen einerseits bei den Prozessabläufen (TOC) an, drängen zu einer kontinuierlichen Verbesserung in kleinen Schritten mit Einbezug der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen (KVP und Kaizen) oder fokussieren sich andererseits auf die Anlagen und verhelfen zu einer effizienteren Nutzung derselben (TPM). Dadurch können Verbesserungen erreicht werden. Für die Beantwortung der Forschungsfrage ist jedoch nur ein Ansatz geeignet; TPM führt in die richtige Richtung. Die Gesamtanlageneffektivität, als umfassende Kenngröße, welche die Anlagenauslastung untersucht und im TPM integriert ist, eignet sich, um einen Teil der Aufgabenstellung zu lösen. Damit kann die Anlageneffektivität dargestellt und analysiert werden. Der Blickwinkel im Modell vonseiten der Anlage kann damit abgedeckt werden. Diese Erkenntnis trägt zur Beantwortung der zweiten Teilfrage bei.

Je nach Branche und Unternehmen stehen verschiedene Zielgrößen im Zentrum des Produktionscontrollings und der Verbesserung. Meist sind die Durchlaufzeit, der Bestand und die Anlagenauslastung als zentrale logistische Kenngrößen, ein fixer Bestandteil eines Produktionskennzahlencockpits. Das Trichtermodell und das Durchlaufdiagramm behandeln diese Zielgrößen teilweise im Detail. Mittels dieser kann die Ausgangsproblematik der vorliegenden Arbeit aber nicht vollständig gelöst werden, da sie keine Zielwerte angeben und die Positionierung im logistischen Spannungsfeld nicht ausreichend unterstützen. Ein passendes Modell für die Angabe des idealen Bestandsbereiches ist somit noch ausständig.

Diesen Bereich könnte das Modell der Produktionskennlinien abdecken, welches eine Weiterentwicklung des Ansatzes des Durchlaufdiagramms ist. Ob sich dieses Modell als Grundlage des zu entwickelnden Wirkmodells eignet, wird im nächsten Kapitel geklärt.

4 Produktionskennlinien

„Die Wissenschaft braucht Zusammenarbeit, in der sich das Wissen des einen durch die Entdeckung des anderen bereichert.“

José Ortega Y Gasset (1883-1955), spanischer Philosoph

In diesem Kapitel wird das Modell der Produktionskennlinie erörtert; ausgehend vom Dilemma der Ablaufplanung, der idealen Produktionskennlinie bis zur realen, da jene den zweiten Teil der Aufgabenstellung lösen könnte. Ebenfalls wird die Berechnung derselben geklärt und auf die Wichtigkeit der Festlegung der empirischen Parameter eingegangen. Zum Abschluss zeigt die Diskussion von Warteschlangentheorie und Simulation, dass die Produktionskennlinie für die Beantwortung der Forschungsfrage geeignet ist.

4.1 Dilemma der Ablaufplanung

Das Dilemma der Ablaufplanung²⁵⁸ befasst sich mit dem Widerspruch der Erreichung von maximaler Auslastung bei minimalen Beständen, minimaler Durchlaufzeit und maximaler Termintreue (siehe Abbildung 18).

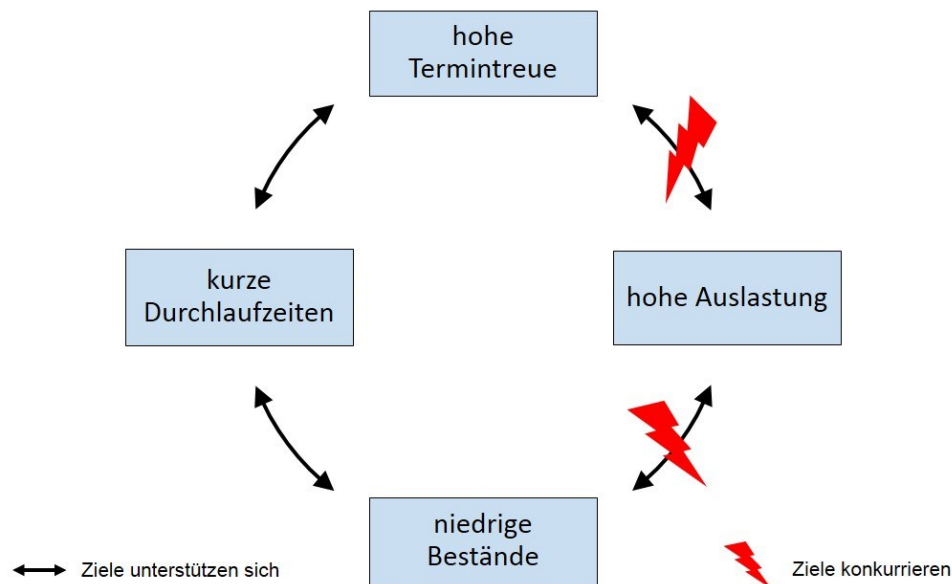


Abbildung 18: Dilemma der Ablaufplanung²⁵⁹

²⁵⁸ Siehe Gutenberg, E. (1983)

²⁵⁹ Quelle: In Anlehnung an Nyhuis, P., <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Logistische-Kennlinien/Produktionskennlinien> (Zugriff: 10.09.2015)

Doch einhergehende Maxima und Minima dieser Zielgrößen sind nicht zu erreichen. Es muss ein Optimum für die jeweilige konkrete Situation gefunden werden. Erforderlich sind dazu sowohl quantitative als auch qualitative Beschreibungen und Erklärungen der Interdependenzen dieser Größen und deren Beeinflussungsmöglichkeiten.²⁶⁰

Dafür eignet sich die Produktionskennlinie²⁶¹ nach NYHUIS und WIENDAHL. Mittels dieser lässt sich unter Berücksichtigung der Auslastung, des Bestandes, der Durchlaufzeit und in weiterer Form der Termintreue, ein optimaler Betriebsbereich identifizieren.²⁶²

4.2 Begriffsklärung

Abgeleitet vom Trichtermodell und dem Durchlaufdiagramm wurden die Produktionskennlinien entwickelt, da in den zwei Erstgenannten die Wirkzusammenhänge zwischen logistischen Kenngrößen nicht vollständig beschrieben werden. „Produktionskennlinien bilden die Wirkzusammenhänge der logistischen Zielgrößen Bestand, Leistung und Durchlaufzeit ab und unterstützen damit die logistische Positionierung eines Arbeitssystems in dem durch diese Zielgrößen aufgezogenen Spannungsfeld.“²⁶³

Stationäre Betriebszustände wie beispielsweise hohes oder geringes Bestandsniveau lassen sich durch Trichtermodell, Durchlaufdiagramm und abgeleitete Kennzahlen beschreiben und durch Produktionskennlinien stark verdichtet darstellen. Dazu werden die Werte für Leistung und Durchlaufgrößen in Abhängigkeit vom Bestand aufgetragen. Im oberen Teil der Abbildung 19 sind die Betriebszustände zu erkennen. Im unteren Teil, der Produktionskennlinie, ist abzulesen, dass ab einem gewissen Bestandsniveau keine Leistungssteigerung möglich ist. Die maximal mögliche Leistung der Anlage ist erreicht. Ab diesem Level baut sich Bestand schneller auf als er abgearbeitet werden kann und es treten keine bestandsbedingten Leistungseinbußen auf. Unterhalb dieses Bestandwertes ist die Anlage nicht voll ausgelastet. Dabei ist die Durchlaufzeit auf einem konstanten Wert. Denn unter die Dauer der Durchführung kann diese nicht sinken. Ab dem Bestandsniveau steigt die Durchlaufzeit proportional an. Die Linie der Reichweite ergibt sich durch das Verhältnis aus Bestand und Leistung (Trichterformel).²⁶⁴

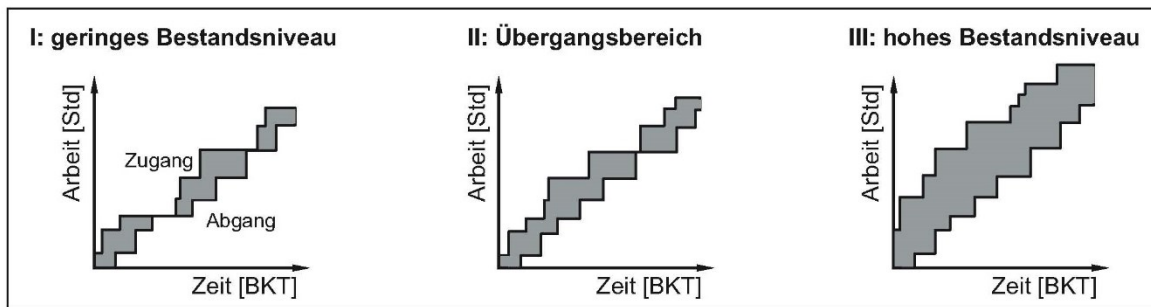
²⁶⁰ Vgl. Samac, K. (2014a), S. 31

²⁶¹ In früherer Literatur als Betriebskennlinie bezeichnet

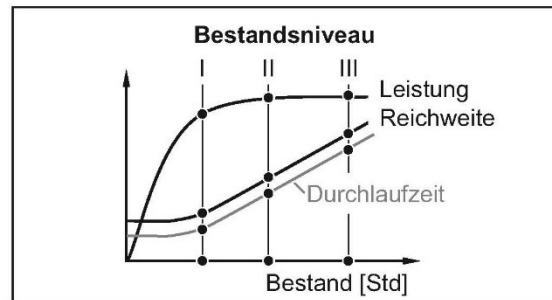
²⁶² Vgl. Nyhuis, P.; Schmidt, M. (2011), S. 388

²⁶³ Münzberg, B. et al. (2009), S. 44

²⁶⁴ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 37; Wriggers, F. S. et al. (2007), S. 41



a) typische Betriebszustände



b) Darstellung der Betriebszustände in Produktionskennlinien

© IFA C0.880B1SW

Abbildung 19: Darstellung der Betriebszustände²⁶⁵

Die Kennlinie gibt das Verhalten des betrachteten Systems bei unterschiedlichem Bestand und unveränderten Rahmenbedingungen wieder. Ebenso können sie herangezogen werden um Auswirkungen von Änderungen der Fertigungs- und Auftragsstrukturen miteinander zu vergleichen.²⁶⁶

Die Produktionskennlinie ist ein deduktiv-experimentelles und statisches Erklärungsmodell, welches die Wechselwirkungen zwischen logistischen Zielgrößen in einem Produktionssystem abbildet.²⁶⁷ Dabei ist die zugrundeliegende Modellstruktur der deduktive Anteil, der allgemeingültig interpretierbar ist. Experimentell sind die Parameter zur Anpassung an reale Gegebenheiten, die durch Simulationen angepasst wurden.²⁶⁸ In Abbildung 20 ist eine Produktionskennlinie dargestellt. Die Parametrierung wird in Abschnitt 4.4 näher erläutert.

Aufgrund der Berechnung und Darstellung des derzeitigen Betriebspunktes und der mittleren Leistung im Modell der Produktionskennlinie wird sichtbar, ob Verbesserungspotenzial besteht. Einerseits wird aufgrund der Differenz zwischen aktuellem Betriebspunkt und idealem Bestand das Potenzial durch Bestandsreduktion dargestellt und andererseits deutet der Abstand zwischen mittlerer Leistung und maximal möglicher Leistung auf ein Optimierungspotenzial hin.²⁶⁹

²⁶⁵ Quelle: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 37; zitiert nach Busse, T. D. (2013a), S. 18

²⁶⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 37 f.

²⁶⁷ Vgl. Beckmann, H. et al. (2014), S. 23; Hartmann, W. et al. (2009)

²⁶⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 61

²⁶⁹ Vgl. Samac, K. (2014a), S. 34

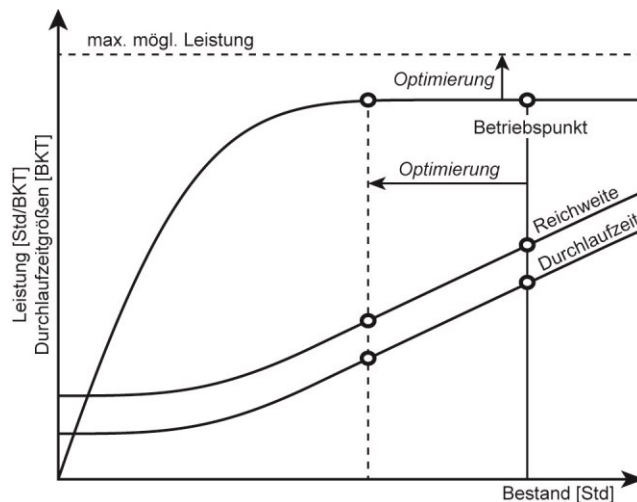


Abbildung 20: Optimierungspotenzial im Modell der Produktionskennlinie²⁷⁰

Im Gegensatz zu einer separaten Betrachtung der logistischen Größen Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue, kann die Darstellung von Abhängigkeiten und Beeinflussungen dieser Kenngrößen untereinander als Vorteil dieses Modells genannt werden. Produktionskennlinien können somit zur Bewertung der aktuellen Situation herangezogen und zum Sichtbarmachen von Verbesserungspotenzialen eingesetzt werden.²⁷¹

4.3 Ideale Produktionskennlinie

Eine ideale Produktionskennlinie bildet die Situation von idealisierten Fertigungsabläufen ab, welche durch folgende Bedingungen gegeben sind:²⁷²

- Es wird ein Arbeitssystem betrachtet, in dem sich immer genau ein Auftrag befindet.
- Der Auftrag muss nicht auf die Bearbeitung warten, sondern wird sofort bearbeitet. Die Übergangszeit ist Null und die Transportzeit vernachlässigbar gering.
- Die maximal mögliche Leistung gibt die obere Leistungsgrenze vor.
- Die Arbeitsinhalte und Aufträge stehen fest und werden nicht verändert.
- Die Aufträge werden losweise transportiert. Somit gibt es keine überlappende Fertigung.
- Der Untersuchungszeitraum ist lang genug um repräsentativ zu sein.

Ein unter diesen Bedingungen erstelltes Durchlaufdiagramm ist in Abbildung 21 zu sehen, wobei die x- und y-Achse gleich skaliert sind – in Vorgabestunden. Daraus kann der ideale Mindestbestand berechnet werden. Er ist der Mittelwert dieses Bestandes und berechnet sich aus den Summen der Auftragszeitquadrate gekürzt durch die Summe der Einzelwerte der Auftragszeiten:²⁷³

$$BI_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad (4.1)$$

²⁷⁰ Quelle: In Anlehnung an Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 84

²⁷¹ Vgl. Samac, K. (2014a), S. 34

²⁷² Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 62

²⁷³ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 63 f.

mit

BI_{min} Idealer Mindestbestand [Std]

ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

n Anzahl zurück gemeldeter Aufträge [-]

Der ideale Mindestbestand lässt sich auch über die Standardabweichung und den Mittelwert berechnen und im Weiteren mittels Variationskoeffizient:²⁷⁴

$$BI_{min} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} = ZAU_m * (1 + ZAU_v^2) \quad (4.2)$$

mit

BI_{min} Idealer Mindestbestand [Std]

ZAU_m Mittlere Auftragszeit [Std]

ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit [Std]

ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Die maximal mögliche Leistung ist im Grunde die Kapazität, welche entweder durch das Personal oder das Betriebsmittel begrenzt wird.²⁷⁵

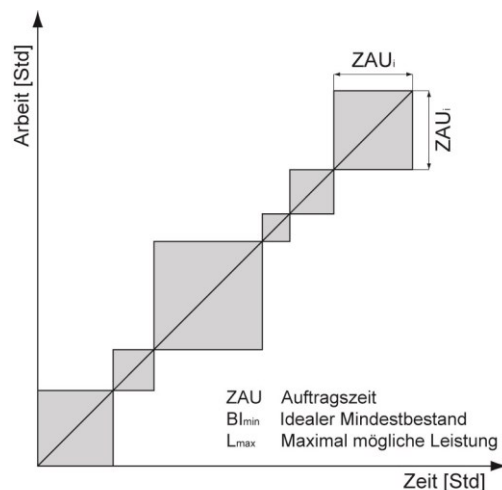
$$L_{max} = \min\{BKAP_v, PKAP_n\} \quad (4.3)$$

mit

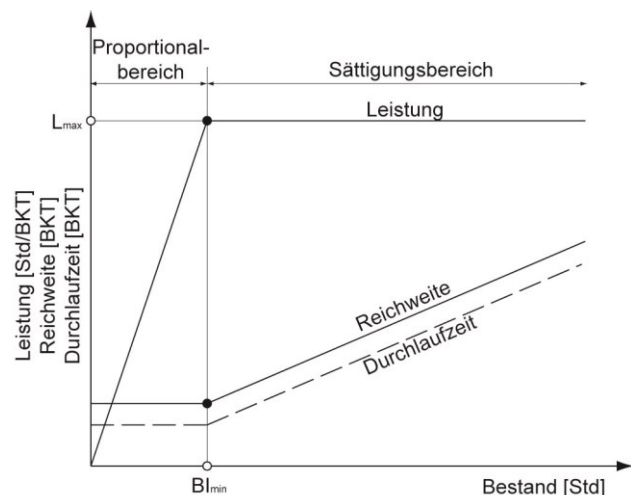
L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

$BKAP_v$ Verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]

$PKAP_n$ Nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]



a) idealer Fertigungsverlauf



b) ideale Produktionskennlinie

Abbildung 21: Herleitung einer idealen Produktionskennlinie²⁷⁶

²⁷⁴ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 64

²⁷⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 66

²⁷⁶ Quelle: In Anlehnung an Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 67

In Abbildung 21 ist die ideale Kennlinie dargestellt. Hier ist erkennbar, dass nur die bestandsbedingten Auslastungsverluste über die Leistungskennlinie gezeigt werden und Verluste der Leistung bzw. Auslastung aufgrund anderer Größen bereits in die maximal mögliche Leistung eingehen. Ist der mittlere Bestand geringer als der ideale Mindestbestand, kommt es zu Leerzeiten und Leistungseinbußen, die proportional zur Bestandsreduzierung sind (Proportionalbereich). Ist der mittlere Bestand höher als der ideale Mindestbestand, kann die Leistung trotzdem nicht erhöht werden, da die obere Grenze schon erreicht ist (Sättigungsbereich).

Die Kennlinie der idealen Reichweite leitet sich aus der Trichterformel (3.26) ab und wird über das Verhältnis vom idealen Mindestbestand und der maximalen Leistung berechnet. Im Sättigungsbereich steigt diese proportional zur Bestandsveränderung. Davor bleibt sie konstant am Niveau der Mindestreichweite.²⁷⁷

$$R_{min} = \frac{BI_{min}}{L_{max}} \quad (4.4)$$

mit

R_{min}	Mindestreichweite [BKT]
BI_{min}	Idealer Mindestbestand [Std]
L_{max}	Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Mittels der Durchführungszeit und bei Vernachlässigung der Transportzeit lässt sich die Mindestreichweite wie folgt berechnen:²⁷⁸

$$R_{min} = ZDF_m * (1 + ZDF_v^2) \quad (4.5)$$

mit

R_{min}	Mindestreichweite [BKT]
ZDF_m	Mittlere Durchführungszeit [BKT]
ZDF_v	Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Die Mindestdurchlaufzeit kann bei vernachlässigbarer Transportzeit den Wert der mittleren Durchführungszeit nicht unterschreiten:²⁷⁹

$$DLF_{min} = ZDF_m \quad (4.6)$$

4.4 Reale Produktionskennlinie

Da in der Praxis die Rahmenbedingungen von jenen der idealen Produktionskennlinie nicht gegeben sind, weichen die realen Bezugspunkte von der idealen Kennlinie ab. Es gibt keinen ausgewiesenen Abknickpunkt, sondern einen Abknickbereich. Durch Simulationsstudien wurde bestätigt, dass simulierte Kennlinien von den gleichen Größen abhängig sind, die die idealen

²⁷⁷ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 68

²⁷⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 68

²⁷⁹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 69

Kennlinien beeinflussen. Bei größeren Arbeitszeiten, deren Streuungen und dem idealen Mindestbestand muss der Bestandspuffer umso größer sein, um Leistungseinbußen vorzubeugen. Des Weiteren wurden die Einflüsse der Kapazitätsflexibilität, die Belastungsstreuung und das logistische Leistungsverhalten eines Arbeitssystems herausgearbeitet, welche im Streckfaktor α_1 zusammengefasst werden. Die Parameter zur Berechnung einer realen Produktionskennlinie sind in Abbildung 22 dargestellt.²⁸⁰

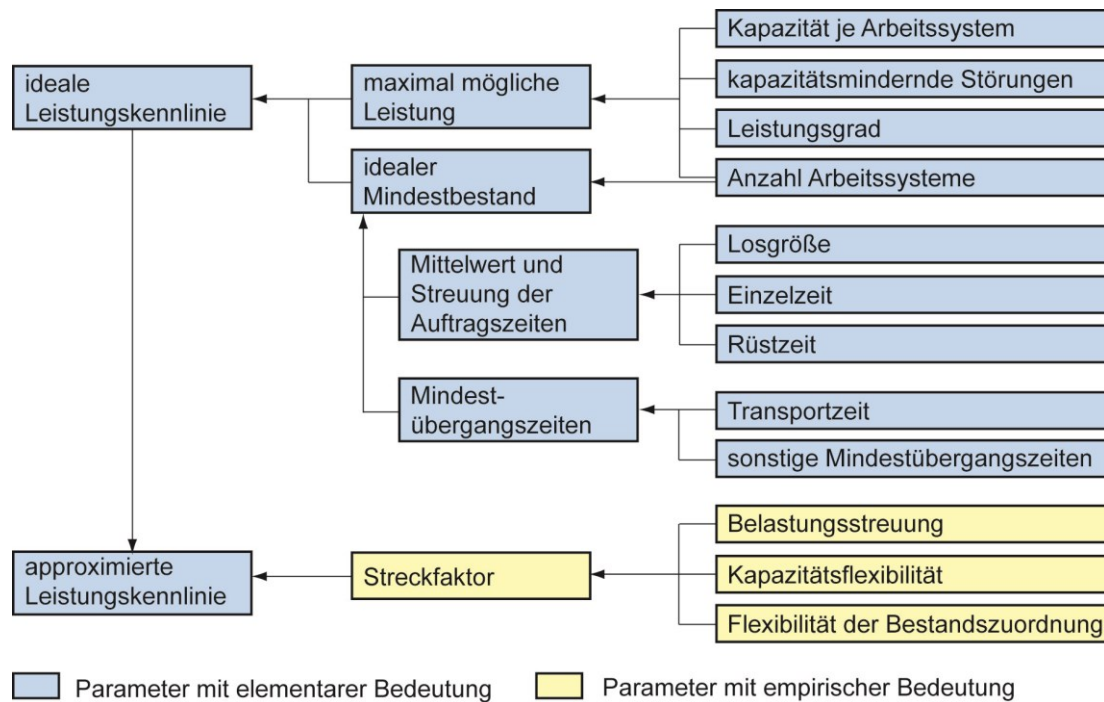


Abbildung 22: Parameter einer realen Produktionskennlinie²⁸¹

Anzumerken ist, dass die reale Leistungskennlinie von der idealen begrenzt wird und somit die ideale Leistungskennlinie als Bezugskoordinatensystem für eine berechnete Kennlinie herangezogen werden kann.²⁸²

4.4.1 Näherungsgleichung

Zur Konstruktion der realen Kennlinie hat NYHUIS die C_{Norm} -Funktion als Näherungsgleichung gewählt. Sie ist eine Verallgemeinerung der Kreisgleichung.²⁸³

$$1 = |x|^c + |y|^c \quad (4.7)$$

²⁸⁰ Vgl. Nyhuis, P. (2008), S. 199 f.

²⁸¹ Quelle: In Anlehnung an Nyhuis, P. (2008), S. 200

²⁸² Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 70

²⁸³ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 72

Des Weiteren gilt:²⁸⁴

$$\begin{aligned}x(t) &= t \\y(t) &= -\sqrt[c]{1-t^c}\end{aligned}\quad (4.8)$$

Der Wert C dieser Funktion legt fest, wie stark sich die Kennlinie an den Abknickpunkt der idealen Kennlinie anschmiegt. Umso kleiner der Wert ist, desto enger ist die berechnete Linie. NYHUIS legt fest, dass der Abknickpunkt im originalen Koordinatensystem beim Schnittpunkt der C_{Norm} -Funktion mit der Winkelhalbierenden liegt. Durch Simulationen wurde herausgefunden, dass sich der Abknickpunkt bei bestandsbedingten Leistungsverlusten von ca. 6% befindet und somit die Winkelhalbierende bei $y=-0,06$ schneiden muss. Somit ist für C ein Wert von 0,25 vorgegeben.²⁸⁵ Für nähere Ausführungen siehe NYHUIS²⁸⁶.

$$y_{AB} = -\sqrt[c]{\frac{1}{2}} = -0,06 \quad (4.9)$$

$$C = \frac{\ln(\frac{1}{2})}{\ln(0,06)} \cong 0,25 \quad (4.10)$$

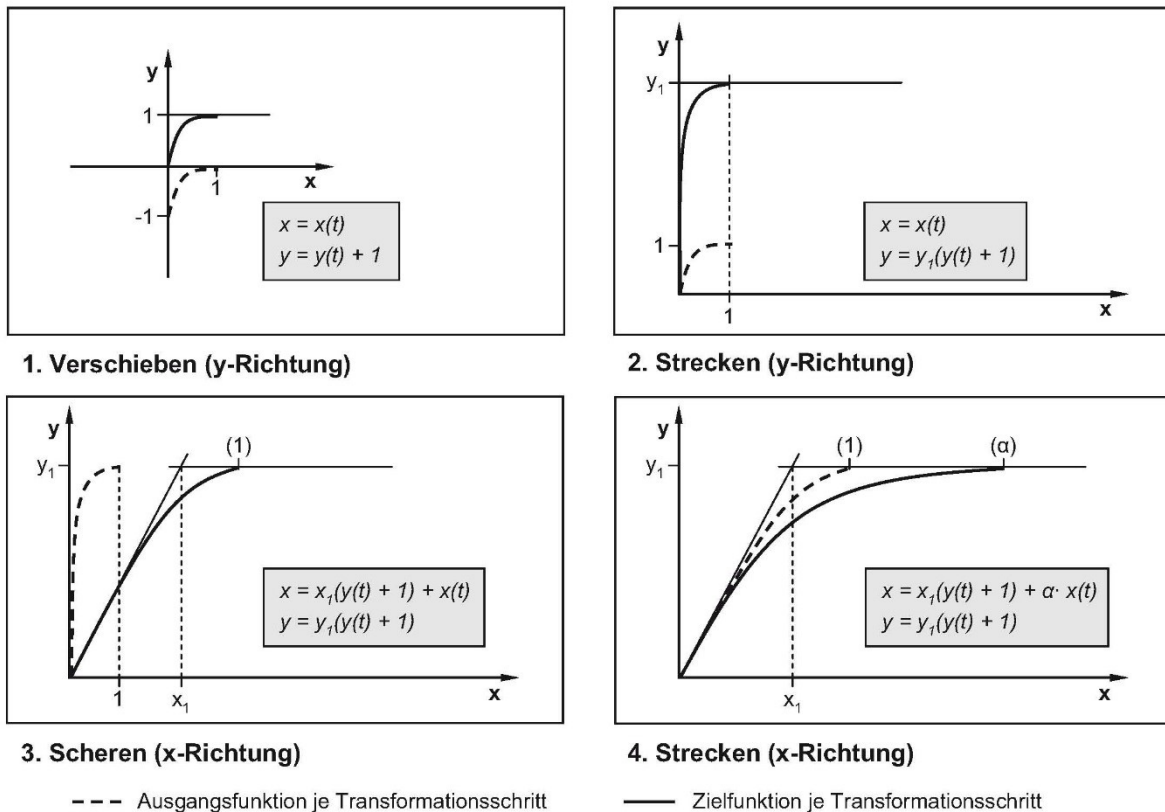
Durch eine affine Transformation in vier Schritten wird die Näherungsgleichung für die reale Produktionskennlinie ermittelt, siehe Abbildung 23. Im ersten Schritt wird der Anfangswert in den Ursprung des Koordinatensystems gelegt, indem der gewählte Kurvenabschnitt um den Wert 1 in y-Richtung verschoben wird. Im zweiten Transformationsschritt wird die Kurve in y-Richtung gestreckt, sodass der maximale Wert der Funktion y_1 in y-Richtung gleich der maximal möglichen Leistung ist. Danach ist der Abknickpunkt in x-Richtung auf den Mindestbestand zu verschieben (Scherung), sodass sich die Linie mit der idealen Kennlinie deckt. Im letzten Schritt wird die Linie um den Streckfaktor α in x-Richtung gestreckt.²⁸⁷

²⁸⁴ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 72

²⁸⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 73

²⁸⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 71 ff.

²⁸⁷ Vgl. Busse, T. D. (2013a), S. 35 f.



© IFA D2.620ASW_Sh

Abbildung 23: Vier Schritte der Transformation der C_{Norm} -Funktion zur mathematischen Beschreibung von Leistungskennlinien²⁸⁸

$$\alpha = \alpha_1 * x_1 \quad (4.11)$$

mit

α Streckfaktor [-]

Der Streckfaktor α beschreibt den Pufferbestand, der gemeinsam mit dem Mindestbestand die Leistungsfähigkeit des Arbeitssystems bei realen Bedingungen gewährleistet. Je größer der Mindestbestand (x_1) ist, desto größer muss der Pufferbestand sein.²⁸⁹

4.4.2 Berechnung der Produktionskennlinie

Werden in Gleichung (4.8) $x(t)$ durch den mittleren Bestand und $y(t)$ durch die mittlere Leistung ersetzt, entstehen unter Berücksichtigung von Gleichung (4.11) folgende Näherungsgleichungen für die Berechnung der realen Produktionskennlinie:²⁹⁰

$$B_m(t) = BI_{\min} * \left(1 - \sqrt[1-t^c]{1-t^c}\right) + BI_{\min} * \alpha_1 * t \quad (4.12)$$

²⁸⁸ Quelle: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 73; zitiert nach Busse, T. D. (2013a), S. 36

²⁸⁹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 75

²⁹⁰ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 81

$$L_m(t) = L_{max} * \left(1 - \sqrt[c]{1 - t^c}\right) \quad (4.13)$$

mit

- B_m(t) Mittlerer Bestand (als Funktion von t) [Std]
- L_m(t) Mittlere Leistung (als Funktion von t) [Std/BKT]
- BI_{min} Idealer Mindestbestand [Std]
- L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
- C Funktionswert der C_{Norm}-Funktion [-]
- α₁ Streckfaktor [-]

Mit diesen Gleichungen, gegebenen Mindestbestand und maximal möglicher Leistung lässt sich für jedes t (0 ≤ t ≤ 1) ein Wertepaar (mittlerer Bestand und mittlere Leistung) berechnen. Durch die Aneinanderreihung der Wertepaare kann die reale Produktionskennlinie erstellt werden.²⁹¹

Durch Umformung der Gleichung (4.13) kann der Klammerausdruck durch das Verhältnis von mittlerer Leistung und maximal möglicher Leistung ausgedrückt werden, welches die mittlere bestandsabhängige Auslastung darstellt.²⁹²

$$A_m(t) = \frac{L_m(t)}{L_{max}} * 100 = \left(1 - \sqrt[c]{1 - t^c}\right) * 100 \quad (4.14)$$

mit

- Am(t) Mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]
- L_m(t) Mittlere Leistung (als Funktion von t) [Std/BKT]
- L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
- t Laufvariable (0 ≤ t ≤ 1)

4.4.3 Streckfaktor α₁

Dieser empirische Parameter wird laut NYHUIS experimentell ermittelt. Er passt die Kennlinie an reale Gegebenheiten an. Die Festlegung desselben ist wichtig, birgt jedoch eine Unsicherheit in sich. Wird ein falscher Wert für α₁ gewählt, ergeben sich fehlerhafte Aussagen über beispielsweise die Höhe des notwendigen Pufferbestandes um eine Auslastung des Arbeitssystems gewährleisten zu können. Die Wahl des passenden Streckfaktors ist besonders im Übergangsbereich der Leistungskennlinie wichtig, da die mittlere Leistung eines Arbeitssystems davon stark beeinflusst wird. Die Auswirkung von unterschiedlich gewählten Streckfaktoren ist in Abbildung 24 dargestellt. Hier sind Kennlinien mit einem α₁ von 5, 10 und 20 und die Auslastungsdifferenzen zur Basis von einem Streckfaktor von 10 abgebildet. Jener Wert wird von NYHUIS aufgrund von Praxiserkenntnissen und Simulationen als Default-Wert angegeben.²⁹³

²⁹¹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 81

²⁹² Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 81

²⁹³ Vgl. Busse, T. D. (2013a), S. 40

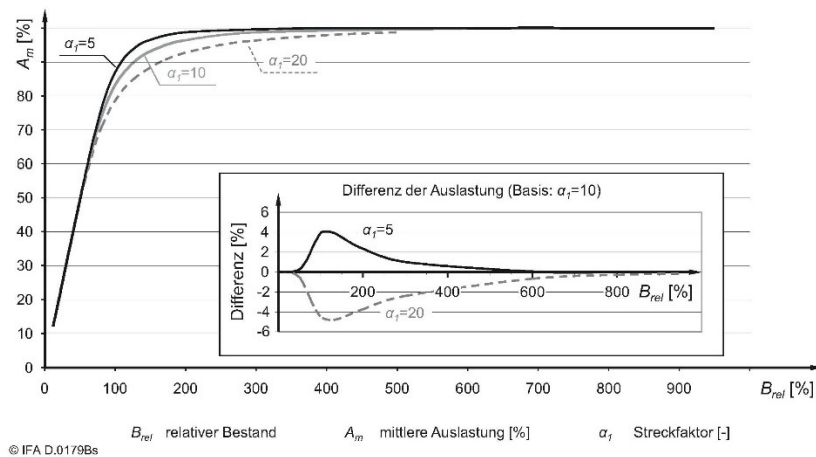


Abbildung 24: Produktionskennlinien bei Variation des Streckfaktors²⁹⁴

Dieser Wert ist bei aufeinander abgestimmte Zu- und Abgänge an einem Arbeitssystem gültig. In der Praxis musste der Streckfaktor mittels einer Modellevaluation der Produktionsablaufdaten überprüft oder empirisch ermittelt werden. Dafür werden anhand von Rückmeldedaten einer Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse von Arbeitssystemen im Unterlast- oder Übergangsbereich die erzielte mittlere Auslastung inkl. bestandsbedingter Auslastungsverluste und das mittlere vorliegende Bestandsniveau ermittelt. Die Ergebnisse werden mit den Werten einer mit angenommenen Streckfaktor erstellten Kennlinie verglichen. Stimmen die Ergebnisse nicht überein, wird der Streckfaktor iterativ angepasst bis eine Übereinstimmung erfolgt.²⁹⁵ Dieser Vorgang ist in Abbildung 25 dargestellt.

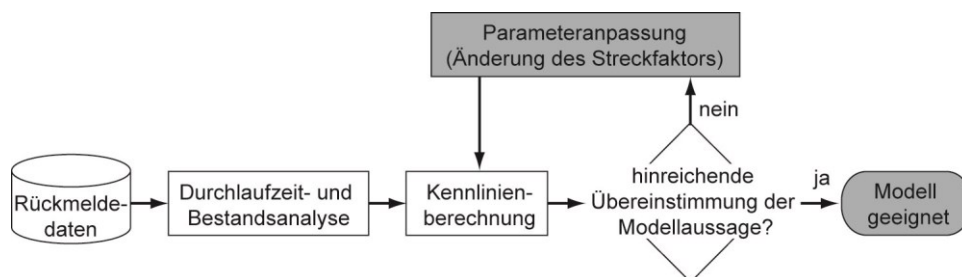


Abbildung 25: Modellevaluation auf Basis betrieblicher Rückmeldedaten²⁹⁶

Einige Autoren wie beispielsweise BURMEISTER²⁹⁷, LÖDDING²⁹⁸, STRATE²⁹⁹, WIENDAHL³⁰⁰ und SCHNEIDER³⁰¹ haben erkannt, dass der Streckfaktor von der Belastungsstreuung und der Kapazitätsflexibilität abhängt.

²⁹⁴ Quelle: Nyhuis, P. (2008), S. 204; zitiert nach Busse, T. D. (2013a), S. 40

²⁹⁵ Vgl. Busse, T. D. (2013b), S. 41 f.

²⁹⁶ Quelle: In Anlehnung an Busse, T. D. (2013a), S. 42

²⁹⁷ Vgl. Burmeister, M. (1997)

²⁹⁸ Vgl. Lödding, H. et al. (2001)

²⁹⁹ Vgl. Strate, O. (2002)

³⁰⁰ Vgl. Wiendahl, H.-P. et al. (2003)

³⁰¹ Vgl. Schneider, M. (2004)

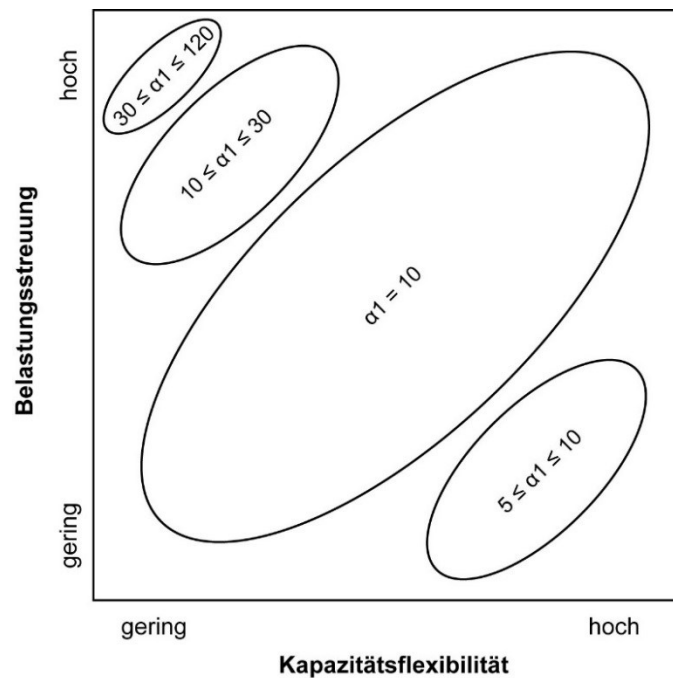


Abbildung 26: Einfluss der Belastungsstreuung und der Kapazitätsflexibilität auf den Streckfaktor³⁰²

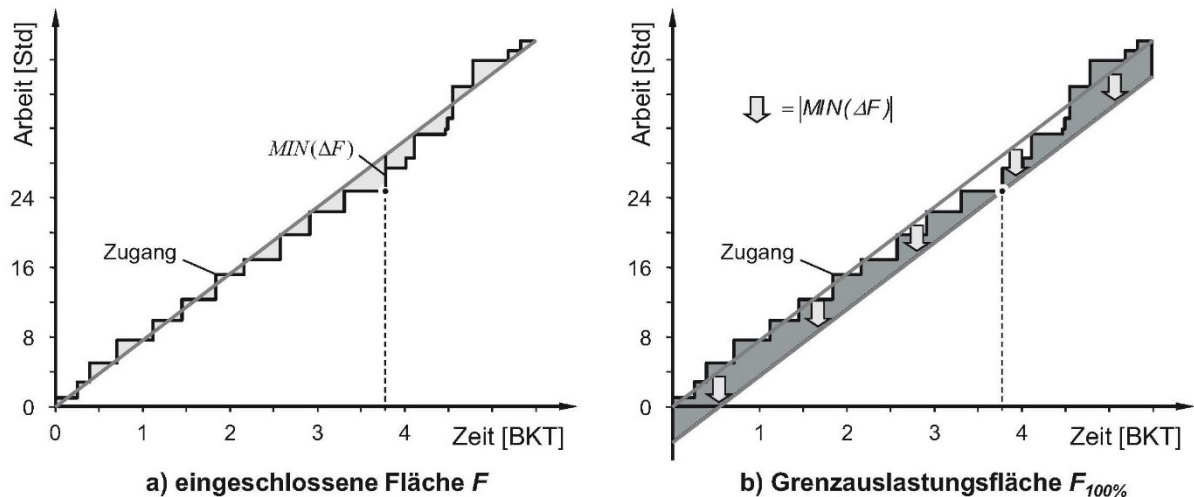
„Der Begriff Belastungsstreuung beschreibt die Abweichung von Planwerten und die Unsicherheiten des Zugangsverhaltens eines Arbeitssystems.“³⁰³ Dies bedeutet, wenn beispielsweise der Arbeitsinhalt und der Anliefertakt der Aufträge stark streuen, muss der Pufferbestand und somit der Streckfaktor größer sein um nicht Gefahr zu laufen, die Anlage bestandsbedingt nicht betreiben zu können. Kann die Kapazität flexibel darauf reagieren wird dem entgegengewirkt und α_1 ist geringer. Bis dahin konnte allerdings keine allgemeingültige mathematische Berechnung entwickelt werden. NYHUIS fasste die Ergebnisse zusammen, welche in Abbildung 26 veranschaulicht sind.

BUSSE widmete sich diesem Thema und entwickelte eine Kennzahl zur mathematischen Beschreibung der Belastungsstreuung bzw. im Weiteren für den Streckfaktor bei starrer Kapazitätsflexibilität. Ausgegangen wird dabei von der Zugangskurve des Durchlaufdiagramms. Damit kann die Grenzauslastungsfläche gebildet werden, welche mit der Belastungsstreuung zusammenhängt. In Abbildung 27a ist die Fläche F (hellgrau) zu erkennen, die sich durch die Zugangskurve und die Belastungsgerade ergibt. Um die Grenzauslastungsfläche $F_{100\%}$ (dunkelgrau, Abbildung 27b) zu erhalten, wird die Belastungsgerade um den maximalen Betrag der Zugangsdifferenz (Fußpunkt des Durchlaufdiagramms) im Untersuchungszeitraum verschoben. Die von Zugangskurve und Gerade eingeschlossene Fläche ist die Grenzauslastungsfläche $F_{100\%}$. Jene ist mit der Bestandsfläche gleichzusetzen, mittels dieser eine 100%-ige Auslastung des Arbeitssystems bei der vorliegenden Belastungsstreuung erreicht werden kann. Dies gilt bei starrer, auf die mittlere Belastung abgestimmter Kapazität.³⁰⁴

³⁰² Quelle: In Anlehnung an Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 99

³⁰³ Busse, T. D. et al. (2012), S. 10

³⁰⁴ Vgl. Busse, T. D. et al. (2012), S. 10



© IFA 15.613

 ΔF Zugangsdifferenz Fußpunkt**Abbildung 27: Grenzauslastungsfläche zur Beschreibung der Belastungsstreuung³⁰⁵**

Die Grenzauslastungsfläche wird auf den Untersuchungszeitraum bezogen, um eine vom Zeitraum unabhängige Kennzahl zu erhalten. Des Weiteren wird diese Kennzahl wiederum auf ihren Idealwert bezogen, sodass sie unabhängig vom vorliegenden Auftragspektrum ist. Der Idealwert ist gleich dem halben idealen Mindestbestand.³⁰⁶ Dies zeigt „Die Division der Grenzauslastungsfläche bei idealen Bedingungen im Zugangsverhalten durch die Länge des Untersuchungszeitraums [...]“³⁰⁷

$$BS_{rel} = \frac{\frac{F_{100\%}}{UZ}}{0,5 * BI_{min}} = \frac{BS}{0,5 * BI_{min}} \quad (4.15)$$

mit

BS_{rel} relative Belastungsstreuung [-]

BS Belastungsstreuung (mittlerer Grenzauslastungsbestand) [Std]

F_{100%} Grenzauslastungsfläche [Std² oder Std*BKT]

UZ Untersuchungszeitraum [Std]

BI_{min} idealer Mindestbestand

Im besten Fall beträgt die relative Belastungsstreuung, als normiertes, dimensionsloses Maß, den Wert 1. Je stärker die Streuung ist, desto größer ist der Wert. Simulations- und Versuchsreihen haben den Zusammenhang zwischen relativer Belastungsstreuung und Streckfaktor bestätigt. Folgende Gleichung wurde für die Berechnung bei einer Kapazitätsflexibilität von Null des Streckfaktors abgeleitet.³⁰⁸

³⁰⁵ Quelle: Busse, T. D. (2013a), S. 62³⁰⁶ Vgl. Busse, T. D. et al. (2012), S. 10³⁰⁷ Busse, T. D. et al. (2012), S. 10³⁰⁸ Vgl. Busse, T. D. et al. (2012), S. 10 f.

$$\alpha_1(BS_{rel}) = 0,399 * (BS_{rel} - 1)^2 \quad (4.16)$$

mit

BS_{rel} relative Belastungsstreuung [-]

α_1 Streckfaktor [-]

4.5 Kritische Würdigung vorhandener Modellierungsansätze von Produktionskennlinien

Es existiert nicht allein die C_{Norm} -Funktion als Näherungsgleichung bzw. Modellierungsansatz für die Produktionskennlinie. Weitere wie die Warteschlangentheorie und die Simulation werden im Folgenden diskutiert.

4.5.1 Warteschlangentheorie

Ausgehend von der Einleitung in die Warteschlangentheorie in Abschnitt 2.3.1 wird dieses Thema hier weiter ausgeführt.

An der Bedienstation kommen Aufträge mit einer Zwischenankunftszeit (Dauer zwischen zwei Aufträgen) an. Die Anzahl der ankommenden Aufträge in einer Zeiteinheit wird Ankunftsrate genannt.³⁰⁹

$$\lambda = \frac{1}{t_a} \quad (4.17)$$

mit

λ mittlere Ankunftsrate [1/Std]

t_a mittlere Zwischenankunftszeit [Std]

Die Anzahl der Aufträge, die pro Zeiteinheit an einer Bedienstation abgearbeitet werden, werden durch die Bedienrate μ angegeben, wobei die Zeit für die Abarbeitung des Auftrages durch die Bedienzeit t_b ausgedrückt wird.³¹⁰

$$\mu = \frac{1}{t_b} \quad (4.18)$$

mit

μ mittlere Bedienrate [1/Std]

t_b mittlere Bedienzeit [Std]

Der Quotient aus Ankunfts- und Bedienrate ist der Auslastungsgrad ρ .³¹¹

³⁰⁹ Vgl. Arnold, D.; Furmans, K. (2007), S. 113

³¹⁰ Vgl. Arnold, D.; Furmans, K. (2007), S. 113

³¹¹ Vgl. Arnold, D.; Furmans, K. (2007), S. 113

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_b}{t_a} \quad (4.19)$$

mit

ρ	Auslastung
μ	mittlere Bedienrate [1/Std]
λ	mittlere Ankunftsrate [1/Std]
t_a	mittlere Zwischenankunftszeit [Std]
t_b	mittlere Bedienzeit [Std]

ARNOLD gibt an, dass sich trotz einer Auslastung von kleiner 1 ($\rho < 1$) eine Warteschlange bilden kann, wenn mindestens der Bedienprozess oder Ankunftsprozess stochastisch ist. Die Länge der Warteschlange N_W (bzw. N_S) ist umso größer, je näher die Auslastung dem Wert 1 kommt. Nach ausreichend langer Dauer und einem Auslastungsgrad größer 1 ($\rho > 1$) erreicht das Warteschlangensystem einen eingeschwungenen Zustand mit stationärer Verteilung und einem konstanten Mittelwert N_W .³¹²

1953 veröffentlicht KENDALL³¹³ eine Notation zur Beschreibung verschiedener Warteschlangenmodelle, die heute weit verbreitet angewandt wird. Die Notation besteht aus sechs Merkmalen:

$$A/B/c/n/v/s$$

mit

A	Verteilung der Ankunftsabstände
B	Verteilung der Bedienzeiten
c	Anzahl der Bedienstationen
n	Systemkapazität
v	Anzahl der möglichen Kunden
s	Warteschlangendisziplin

Es gibt immer eine endliche Anzahl an Bedienstationen. So kann c nicht unendlich sein. Die Systemkapazität n gibt die maximale Anzahl an freien Plätzen an, die die Warteschlange und die Bedienstation gemeinsam aufweisen. Hier ist eine unendliche Anzahl möglich. Dann wird n durch ∞ ersetzt. Dies gilt auch für die Anzahl der möglichen Kunden. Die Warteschlangendisziplin s kann FIFO (First In First Out), LIFO (Last In First Out), PRIO (Auswahl gemäß Prioritäten), SIRO (Service In Random Order) oder SPT (Shortest Processing Time) sein.³¹⁴

Die häufigsten Abkürzungen für die Beschreibung der Verteilungen von Ankunftsabständen A und Bedienzeiten B sind in Tabelle 7 aufgelistet.

³¹² Vgl. Arnold, D.; Furmans, K. (2007), S. 113 f.

³¹³ Vgl. Kendall, D. G. (1953), S. 339 ff.

³¹⁴ Vgl. Hedtstück, U. (2013), S. 195

Tabelle 7: Abkürzungen der Verteilungen der Ankunftsabstände und Bedienzeiten³¹⁵

Symbol	Stehend für
M	Exponentialverteilung (Markov)
G	„General“, generelle Verteilung
D	Deterministische Verteilung
E_k	k-stufige Erlang-Verteilung

Für weitere Ausführungen der unterschiedlichen Modelle sei an dieser Stelle auf GROSS et al.³¹⁶ und HOPP und SPEARMAN³¹⁷ verwiesen.

Die Warteschlangenmodelle können in drei Gruppen eingeteilt werden, die LORENZ aufgrund einer Studie identifiziert hat:³¹⁸

- Analytische Lösungen: Die mittleren Wartezeiten werden exakt berechnet.
- Näherungslösungen: Sie ergeben angenäherte Werte.
- Abschätzungslösungen: Für die Mittelwerte werden obere und untere Grenzen angegeben.

Diskussion der Warteschlangentheorie als Modellierungsansatz

NYHUIS und WIENDAHL zeigen, dass unter der Verwendung vom M/G/1-Modell und Little's Law eine einfache Produktionskennlinie erstellt werden kann. Die ableitbaren Ergebnisse des Modells weisen einen generellen Charakter auf und sind innerhalb der Modellgrenzen bei beliebigen Anwendungen gültig. In der Literatur wird Kritik an der Warteschlangentheorie geübt. So meint GUDEHUS, dass diese Theorie sehr kompliziert ist und die notwendigen Rahmenbedingungen in der Praxis nicht gegeben bzw. nicht überprüfbar sind.³¹⁹ KIENCKE unterstützt diese Aussage und ergänzt, dass die Berechnungen größtenteils für eingeschwungene Systemzustände gültig sind, die in der Praxis selten gegeben sind.³²⁰ Für richtige Ergebnisse für das berechnete Systemverhalten müssen die Verteilungstypen bekannt sein. Dies ist schon bei existierenden Arbeitssystemen sehr aufwendig und wird deswegen in der Literatur kritisiert. Hinzu kommt, dass sich die Verteilungstypen über die Zeit ändern können, da Produktionsprozesse dynamisch sind. Deswegen muss für jeden Einzelfall entschieden werden, welche Verteilungsformen und -parameter anzuwenden sind. Nach LORENZ ist dies ausschlaggebend für unzureichende Übereinstimmung realer und mittels Warteschlangenmodelle berechneter Durchlaufzeiten.³²¹ Ein weiteres Problem ist, dass eine Abhängigkeit zwischen Zugangs- und Abgangsprozess besteht, welche in den bekannten Modellen der Warteschlangentheorie nicht zugelassen ist.³²²

³¹⁵ Quelle: In Anlehnung an Baum, D. (2013), S. 367

³¹⁶ Siehe Gross, D. et al. (2008)

³¹⁷ Siehe Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2001), S. 264 ff.

³¹⁸ Vgl. Lorenz, W. (1984); zitiert nach Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 41

³¹⁹ Vgl. Gudehus, T. (2012), S. 486

³²⁰ Vgl. Kiencke, U. (2006); zitiert nach Scholz-Reiter, B. et al. (2008), S. 116 f.

³²¹ Vgl. Lorenz, W. (1984); zitiert nach Schneider, M. (2004), S. 15

³²² Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 49

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Warteschlangentheorie bei einfachen Modellen unter wenig Aufwand anwendbar ist, unter realen Voraussetzungen aber erhebliche Abstraktionen erforderlich sind. Denn die Annahmen und Voraussetzungen sind in der Praxis selten gegeben. So reicht die Genauigkeit der Ergebnisse nicht aus; es sind Tendenzaussagen, die für die Praxis nicht aussagekräftig genug sind.³²³ Deswegen hat sich die Warteschlangentheorie zur Beschreibung des logistischen Systemverhaltens bzw. zur Ermittlung logistischer Kennlinien nicht durchgesetzt.³²⁴

4.5.2 Simulation

Zur Ermittlung der Kennlinien können neben den Warteschlangenmodellen Simulationen eingesetzt werden. Eine Simulation bildet dynamische Prozesse eines Modells nach und lässt eine Übertragung der Ergebnisse auf die Realität zu.³²⁵ Damit kann das Verhalten von realen Systemen bei einer Veränderung der Simulationsbedingungen analysiert und beschrieben werden.³²⁶ Sie eignen sich vor allem bei folgenden Situationen:³²⁷

- Die Untersuchung des zeitlichen Ablaufverhaltens eines Systems soll durchgeführt werden.
- Analytische Methoden stoßen an ihre Grenzen.
- Experimente am Realsystem können nicht durchgeführt werden.
- Komplexe Wirkzusammenhänge können mit deduktiven Modellen nicht dargestellt werden.

Aufgrund des Fortschritts in der Hard- und Softwaretechnologie und der steigenden Leistungsfähigkeit hält sich mittlerweile der Aufwand zur Erstellung eines Modells im Vergleich zur Ableitung von deduktiven Modellen in Grenzen. Durch den modularen Aufbau von Simulationen mittels Modellbausteinen oder offenen Datenschnittstellen steigt die Benutzerfreundlichkeit. Somit können komplexe Modelle relativ schnell aufgebaut werden.³²⁸

Obwohl die Modellerstellung oftmals einfach ist, muss das Modell validiert werden bevor die Ergebnisse als gültig anerkannt werden können, um den ersten Nachteil zu erwähnen. Dies muss vor jedem neuen Anwendungsfall durchgeführt werden. Auch wenn das Modell durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ablaufdaten getestet werden kann, ist dies nur die Bestätigung, dass das Modell punktuell gültig ist. Weichen beliebige Parameter, die oftmals nicht erkennbar sind, gering ab, kann es zu signifikanten Veränderungen des Systemverhaltens kommen. Diese Art von Validierung ist möglich, wenn ein Realsystem bereits existiert.³²⁹

³²³ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 49

³²⁴ Vgl. Schneider, M. (2004), S. 15

³²⁵ Vgl. VDI-Richtlinie 3633 (2013); zitiert nach Dangelmaier, W.; Laroque, C., <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Simulation/index.html> (Zugriff: 04.08.2015)

³²⁶ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 50

³²⁷ Vgl. Rabe, M. (1998), S. 7

³²⁸ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 54

³²⁹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 54 f.

Des Weiteren ist anzuführen, dass die Menge, Qualität und Form der Eingabedaten nicht immer ausreichend vorhanden sind. Jede Simulation und die daraus gewonnenen Ergebnisse sind so gut wie die verwendeten Daten.³³⁰ Vor allem aufgrund der Dynamik des Marktes und des raschen Produktionswandels können Kosten- und Zeitaufwand nicht gut eingeschätzt werden. Es ist schwierig die Kapazitätsflexibilität zu erfassen. Teilweise wird sie mittels Hilfsindikatoren oder Manipulation von Parametern eingearbeitet. Dies kann zu falschen Ergebnissen führen.³³¹

Ein Beispiel für die Sensibilität von Simulationen bringt KRAUT, indem er die Ergebnisse von acht Simulationen vergleicht. Alle Acht gingen von einer identischen Ausgangssituation aus und verwendeten die gleichen Daten. Jedoch unterscheiden sich alle Ergebnisse, einige eklatant.³³²

Im Allgemeinen können Produktionskennlinien mittels einer Vielzahl von Simulationsdurchläufen erstellt werden, in denen die Bestandsgröße verändert wird. Nähere Beschreibungen geben NYHUIS und WIENDAHL.³³³ Aufgrund der oben genannten Argumente, wie der Vielfalt von Parametereinstellungen und Szenarien, sowie dem damit verbundenen Aufwand ist dies nicht empfehlenswert.³³⁴ In der Praxis haben sich Simulationen aufgrund des hohen Aufwandes nicht durchgesetzt.³³⁵

Dies bestätigt die Erfahrung, welche während der Durchführung des Fallbeispiels gesammelt wurde. Zu Beginn des Projektes wurde versucht die Produktion und das Produktionsprogramm mittels Simulation darzustellen. Doch schon nach den Interviews mit den Planern, im Zuge dessen die Produktionsregeln aufgenommen werden sollten, stellte sich heraus, dass dies nicht möglich ist. Alle Planungsregeln können nicht vereinfacht bzw. standardisiert abgebildet werden, da einige unterschiedlich je nach Situation von den Planern getroffen werden.

4.6 Diskussion der Produktionskennlinie als Bestandteil des Wirkmodells

Aufgrund der vorhin aufgeführten Argumentationen wird die Produktionskennlinie als geeignet erachtet. Dafür spricht, dass die Produktionskennlinie mit einer geringen Menge an Daten zu erstellen ist und die Auswertungen leicht und schnell durchführbar sind. Des Weiteren haben einige Wissenschaftler mit dem Modell der Produktionskennlinie gearbeitet, es weiter entwickelt und die Forschung in diesem Bereich vorangetrieben. Folgende Weiterentwicklungen können beispielhaft genannt werden:

- Durchlaufzeitkennlinie bei KOZ (kürzeste Operationszeit) und LOZ (längste Operationszeit)³³⁶
- Produktionskennlinien bei Fertigungsinseln³³⁷

³³⁰ Vgl. Kosturiak, J.; Gregor, M. (1995), S. 66

³³¹ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 55

³³² Vgl. Krauth, J. (1992), S. 31

³³³ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 52

³³⁴ Vgl. Schömig, A. et al. (2007), S. 468

³³⁵ Vgl. Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012), S. 59

³³⁶ Siehe Hartmann, W. et al. (2009); Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012)

³³⁷ Siehe Lödding, H. et al. (2001)

- Prozesskennlinien³³⁸
- Hierarchische Verdichtung von Leistungskennlinien³³⁹
- Produktionskennlinien im Prozesskettenparadigma³⁴⁰

Praxisberichte zeigen ebenfalls, dass das Modell angewendet wird. Für nähere Ausführungen siehe WIENDAHL et al.³⁴¹, NYHUIS und VOGEL³⁴², NYHUIS³⁴³, NYHUIS und WIENDAHL³⁴⁴, WRIGGERS et al.³⁴⁵, BECKMANN et al.³⁴⁶, BUSSE³⁴⁷, KERNER³⁴⁸ und NACHTWEY³⁴⁹.

INDERFURTH et al. üben Kritik an den Lagerkennlinien von NYHUIS und WIENDAHL. Obwohl sich diese von den Produktionskennlinien unterscheiden, kann ein Kritikpunkt auf die Produktionskennlinien bezogen werden. INDERFURTH et al. kritisieren die Wahl des C_{Norm} -Funktionswertes. Dieser ist für die Anpassung der idealen Kennlinie an den realen Verlauf verantwortlich. Die Angabe dieses Wertes ist zu unpräzise und kann in Einzelfällen zu starken Abweichungen führen.³⁵⁰ Auf diesen Punkt wird in Abschnitt 6.3 bei der Ausarbeitung des Fallbeispiels Bezug genommen.

Trotz dieser Kritik wird das Modell der Produktionskennlinien als geeignet angesehen und für die Entwicklung des geforderten Wirkmodells herangezogen, da folgende Argumente dafür sprechen:

- Leicht anwendbar
- Aussagekräftig
- Geringe Datenmenge erforderlich
- Beschreibt den Zusammenhang zwischen Bestand und Auslastung/Leistung

Somit kann die zweite Teilfrage vollständig beantwortet werden. Die Gesamtanlageneffektivität und die Produktionskennlinie eignen sich für die Zusammenstellung des Wirkmodells.

³³⁸ Siehe Schneider, M. (2012); Wiendahl, H.-P.; Schneider, M. (2002)

³³⁹ Siehe Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012)

³⁴⁰ Siehe Beckmann, H. et al. (2014)

³⁴¹ Siehe Wiendahl, H.-P. et al. (2000), S. 147 f.

³⁴² Siehe Nyhuis, P.; Vogel, M. (2005)

³⁴³ Siehe Nyhuis, P. (2008)

³⁴⁴ Siehe Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012)

³⁴⁵ Siehe Wriggers, F. et al. (2009)

³⁴⁶ Siehe Beckmann, H. et al. (2014)

³⁴⁷ Siehe Busse, T. D. et al. (2012)

³⁴⁸ Siehe Kerner, A. (2002)

³⁴⁹ Siehe Nachtwey, A. (2010)

³⁵⁰ Vgl. Inderfurth, K.; Schulz, T. (2006), S. 26; (2008), S. 182

4.7 Zusammenfassung

Die Produktionskennlinie befasst sich mit dem Dilemma der Ablaufplanung und somit mit der logistischen Positionierung eines Arbeitssystems in Betracht von Bestand, Leistung und Durchlaufzeit. Die Verhältnisse, die eine ideale Kennlinie ergeben, sind in der Praxis nicht anzutreffen. Deswegen wird diese durch die C_{Norm} -Funktion und den Streckfaktor α an reale Bedingungen angepasst. Diese Werte sind empirisch, bzw. mathematisch ermittelbar und für genaue Ergebnisse essentiell. Die Produktionskennlinie als Erklärungsmodell zeigt den idealen Bestand bzw. Bestandsbereich, die aktuelle mittlere Leistung und den aktuellen mittleren Bestand. Aus diesem Grund und da sie sich im Vergleich mit der Warteschlangentheorie und der Simulation in diesem Themengebiet durchsetzt, eignet sie sich als Basis des Wirkmodells, welches in dieser Arbeit entwickelt werden soll. Dies trägt zur Beantwortung der zweiten Teilfrage bei.

5 Konzeption und Entwicklung des Wirkmodells und der davon ausgehenden Analyselandschaft

„Sehen, um vorauszusehen, so lautet der Spruch der wahrhaften Wissenschaft.“

Auguste Comte (1798-1857), französischer Soziologe

In diesem Kapitel werden die Entwicklung und das Konzept des Wirkmodells für die Analyse der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund von Einzelanlagen beschrieben. Das Modell der logistischen Kennlinien wird mit der Gesamtanlageneffektivität kombiniert. So sind die Blickwinkel aus Sicht des Bestandes und der Anlage zusammengefügt. Es ist möglich mit diesem Modell die Auswirkungen einer Verbesserung oder Verschlechterung der OEE in der Produktionskennlinie darzustellen und unter den geänderten Gegebenheiten den optimalen Bestandsbereich zu zeigen. Eingebettet wird dieses Modell in eine Analysepyramide, welche den Weg für feinere Analysen beschreibt und Normstrategien vorschlägt.

5.1 Systemabgrenzung

Um aus einer komplexen Ausgangssituation (siehe Abschnitt 3.3) Komplexität zu nehmen und das Modell einfacher zu gestalten, bezieht sich dieses Modell auf eine Einzelanlage bzw. ein Aggregat mit dem Stau- und Pufferlager vor derselben (siehe Abbildung 28). Somit soll damit nicht der gesamte Wertschöpfungsprozess bzw. die gesamte Wertschöpfungskette oder der Produktionsprozess sowie Ablauf analysiert werden. Jede Anlage wird separat analysiert und optimiert. Das Produktionsprogramm und der Materialfluss verbinden danach die Einzelanalysen.

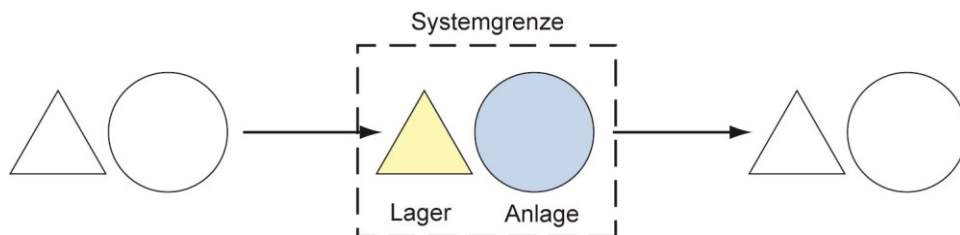


Abbildung 28: Systemabgrenzung

Dabei wird die Anlage von zwei Blickpunkten aus betrachtet: Anlageneffektivität und Bestand.

5.2 Kombination Produktionskennlinienmodell - Gesamtanlageneffektivität

Die Produktionskennlinie legt den Fokus auf den Bestand vor einer Anlage. Den Bestand zu reduzieren bringt einige Vorteile:

- reduziertes gebundenes Kapital
- kürzere Durchlaufzeit
- kleinere Lagerflächen
- weniger Bewegungen des Materials
- kürzere Suchzeiten
- keine Behinderungen durch im Weg stehendes Material

Für das Wirkmodell reicht dies nicht aus. In einer anlagenintensiven Industrie, wie es die Prozessindustrie ist, wird eine hohe Anlagenauslastung und verlustfreie Nutzung der theoretisch möglichen durchhaltbaren Anlagenkapazität bei niedrigen Losgrößen verlangt. Dabei geht es nicht nur vonseiten des Bestandes eine volle Auslastung zu garantieren, sondern die Anlagenverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Deswegen werden die Produktionskennlinie und die Gesamtanlageneffektivität miteinander kombiniert. Durch die Darstellung der Auswirkungen einer Verbesserung der Anlageneffektivität auf den Bestand entsteht das Wirkmodell, welches aufgrund der Ausgangssituation (Kapitel 1) gefordert wurde.

Hierfür eignet sich die OEE, wie in Abschnitt 3.5 beschrieben. In Kombination mit der Produktionskennlinie ergibt dies das geforderte Modell. In Abbildung 29 ist das Modell dargestellt.

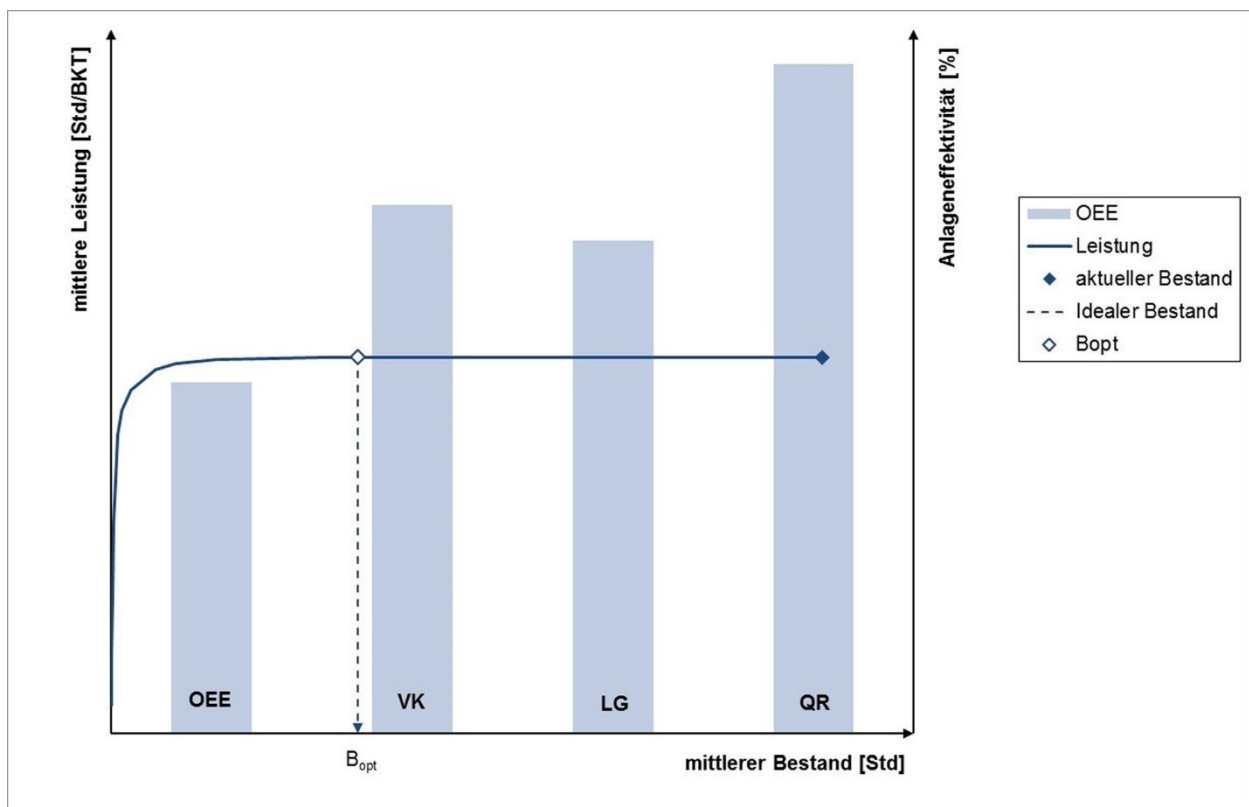


Abbildung 29: Wirkmodell – Entwicklungsstufe 1

ausgegangen wird. Ist es aus Sicht der Produktion, bzw. der Vorgängeranlagen und des Produktionsprozesses möglich den Zugang zu erhöhen kann dieser verändert werden. Dies ist nur ratsam, wenn der Bestand in der Ausgangssituation nahe dem idealen Bestandsbereich liegt.

Mit der Veränderung des Abganges wird die Krümmung der Kurve bzw. der Streckfaktor α_1 nicht verändert. Dieser berechnet sich über die Belastungsstreuung, die vom Zugang vorgegeben wird (siehe Gleichungen (4.15) und (4.16)). Somit verändert sich der ideale Bestand bei gleichbleibendem Produktionsprogramm und Zugang nicht.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Erhöhung der Verfügbarkeit der Anlage die durchschnittliche Leistung erhöht, aber auf den idealen Mindestbestand keine Auswirkungen hat.

$$VK \uparrow \Rightarrow \emptyset L_m \uparrow, BI_{min} \rightarrow$$

5.2.2 Einwirkung des Leistungsgrades

Der Leistungsgrad definiert sich, wie Gleichung (3.6) zeigt, über das Verhältnis von Soll- zu Ist-Leistung. Darin sind die Anlaufschwierigkeiten, kurze Stillstände und die verringerte Taktgeschwindigkeit integriert.³⁵³ Können die Anlaufschwierigkeiten und Stillstände reduziert werden, steigert sich die Taktgeschwindigkeit, wie auch aufgrund technischer Optimierungen. Die Arbeitsinhalte, gemessen an der Zeit, werden kleiner.

Im neuerstellten Modell kann dies durch die Veränderung der Zugangsdaten abgebildet werden. Ist es möglich an der Anlage schneller zu fertigen, reduzieren sich die Auftragszeiten der abzuarbeitenden Aufträge (Zugang). In der Berechnung werden die Auftragszeiten um den Prozentsatz minimiert um den sich die Leistung steigert. Dies wirkt sich auf die mittlere Auftragszeit und die Standardabweichung der Auftragszeit aus. Somit verändert sich der Mindestbestand und dadurch der optimale Bestand (B_{opt}'). Der Streckfaktor wird aufgrund der Zugangsdaten beeinflusst. Dies wirkt sich in der Darstellung durch eine veränderte Krümmung der Leistungslinie und einem niedrigerem idealen Mindestbestand aus (siehe Abbildung 32).

Zusammenfassend heißt dies, dass eine Steigerung der Ist-Leistung und somit des Leistungsgrades eine Reduktion der mittleren Auftragszeiten und des idealen Mindestbestandes zur Folge hat. Das bewirkt eine Änderung des Streckfaktors, die mittlere Leistung ändert sich dadurch nicht.

$$LG \uparrow \Rightarrow ZAU_m \downarrow, BI_{min} \downarrow, \alpha \uparrow$$

Anzumerken ist, dass die Reduktion des Bestandes vorwiegend durch die Verringerung der Bearbeitungszeit erreicht wird. Wenn die Anlage schneller fertigen kann, weisen diese Aufträge eine geringere Bearbeitungszeit auf, wodurch sich der Bestand in Stunden reduziert.

³⁵³ Vgl. Hartmann, E. H. (2007), S. 64

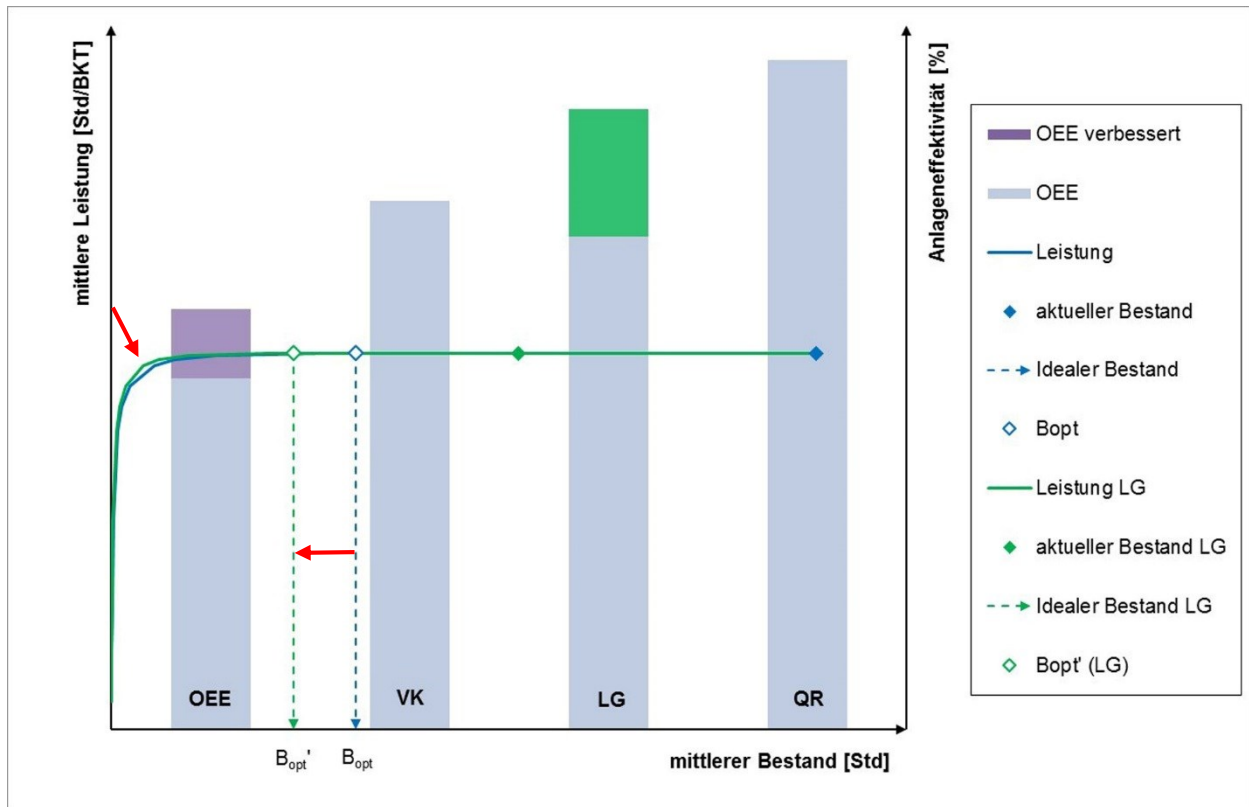


Abbildung 32: Wirkmodell – Änderung Leistungsgrad

Allgemein gilt, dass das Modell nur dann richtige Ergebnisse (bessere mittlere Leistung, B_{opt}') angibt, wenn eine tatsächliche Verbesserung der Verfügbarkeit oder des Leistungsgrades erreicht wird. Wird eine anscheinende Verbesserung durch Veränderung der Bezugsbasis bewirkt, ist die Aussage nicht korrekt. Hierzu ein Beispiel:

Die Ausgangssituation ist mit einer Ist-Leistung von 7 Stk/h und einer Soll-Leistung von 10 Stk/h gegeben. Dies ergibt einen Leistungsgrad von 70%. Für eine Verbesserung des Leistungsgrades auf 80% muss die Ist-Leistung auf 8 Stk/h erhöht werden. Dies entspricht einer tatsächlichen Verbesserung, dessen Auswirkungen im Modell abgebildet sind. Wird der Leistungsgrad auf 80%, aufgrund einer Veränderung der Soll-Leistung auf 8,7 Stk/h, erhöht, werden lediglich die Werte geschönt und eine anscheinende Verbesserung erlangt. In diesem Fall sind die Ergebnisse des Modells nicht zutreffend.

5.2.3 Einwirkung der Qualitätsrate

Die Qualitätsrate wird im Modell ebenso abgebildet. Jedoch kann eine Veränderung derselben nicht über die Kennlinie dargestellt werden, da sie keine Einflüsse auf die Eingabedaten hat. In die Qualitätsrate fließen Ausschussteile und Teile zur Nacharbeit ein (siehe Gleichung (3.7)).³⁵⁴ Wird die Qualitätsrate verbessert, werden weniger fehlerhafte Produkte gefertigt und der Aufwand für die Nacharbeit bzw. Neuerstellung eines fehlerhaften Produktes ist geringer. Die Kennlinie unterscheidet aber nicht, ob die Aufträge neu sind oder aufgrund von Ausschuss erneut abgearbeitet werden müssen. So ändert sich nichts an der Leistung oder dem idealen Bestand.

³⁵⁴ Vgl. Al-Radhi, M. (2002), S. 15

Hier zeigen sich die Grenzen des Wirkmodells. Es unterscheidet nicht zwischen fehlerhaft und fehlerfrei bearbeiteten Aufträgen, sondern zeigt nur die gesamte Leistung bzw. den gesamten Output.

Fasst man alle Verbesserungen zusammen und drückt die Erhöhung der OEE durch die Kennlinie aus, ergibt dies eine Überlagerung der Auswirkungen und es werden sowohl die Leistung gesteigert als auch der ideale Bestand gesenkt. Dies ist in Abbildung 30 durch die lila Kennlinie dargestellt.

Durch die Kombination von Produktionskennlinie und Gesamtanlageneffektivität ist das geforderte Modell entstanden, welches einerseits die Positionierung im logistischen Spannungsfeld unterstützt und andererseits die Wirkung der Verbesserung der Anlageneffektivität auf den idealen Bestand zeigt. Um die Ergebnisse aus diesem Wirkmodell verarbeiten zu können wurde ein Instrumentenset in Form einer Analysepyramide erstellt.

5.3 Analysepyramide – modellbasierter Ansatz zur Optimierung der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund

Die Analysepyramide (siehe Abbildung 33) ist ein modellbasierter Ansatz zur Bestimmung und Umsetzung optimaler Bestände und Verbesserung der Anlageneffizienz. Diese Analysen starten bei der Untersuchung von Einzelanlagen durch das Wirkmodell und der Anwendungen auf der zweiten Ebene. In der untersten Ebene werden die Systemgrenzen erweitert und können Fertigungslinien, Prozesse oder den gesamten Produktionsbereich umschließen. Mit diesem Analysekonzept wird eine ganzheitliche Darstellung, Analyse und Optimierung über die operative Ebene hinaus erreicht.

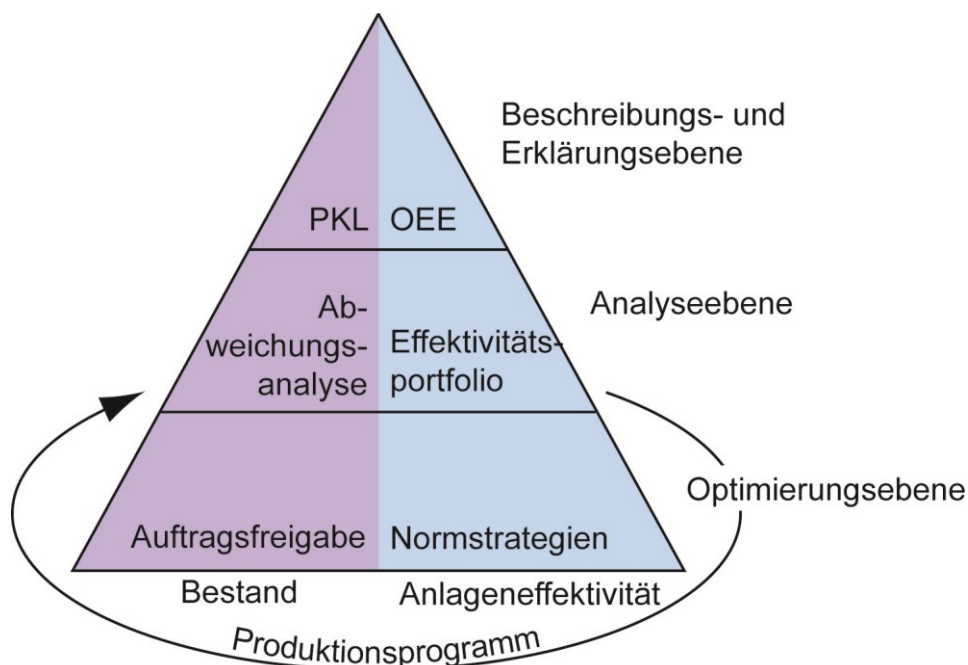


Abbildung 33: Analysepyramide

Das Wirkmodell befindet sich an der Spitze, auf der Beschreibungs- und Erklärungsebene. Darunter folgen weitere zwei Ebenen, auf denen sich die Analysen vertiefen und die jeweils die

Ergebnisse aus der Ebene darüber als Input bekommen. Die Analyseebene umfasst eine Abweichungsanalyse auf der Bestandsseite und die Effektivitätsportfolios auf der Seite der Anlageneffektivität. Eine Ebene tiefer, befindet man sich auf der Optimierungsebene. Dort werden aus den Ergebnissen der Analysen der vorhergehenden Ebene Maßnahmen abgeleitet. Dies betrifft auf der linken Seite die Auftragsfreigabe und auf der rechten Normstrategien für eine Verbesserung der Anlageneffektivität.

Im Folgenden werden die einzelnen Analysefelder der Pyramide beschrieben. Gestartet wird mit der Anlagenseite.

5.3.1 Effektivitätsportfolios

Anhand des Wirkmodells ist zu erkennen, wie effektiv die Anlage arbeitet, unterteilt in die Faktoren Verfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsgrad. Durch die Abbildung der OEE-Faktoren ist nicht erkennbar, wodurch die Ineffektivitäten entstehen. Dafür müssen die Verluste den sechs Verlustquellen zugeordnet und mit Werten hinterlegt werden. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, wirken jeweils zwei Verlustquellen in einen Faktor ein. Dies veranschaulicht Abbildung 34.

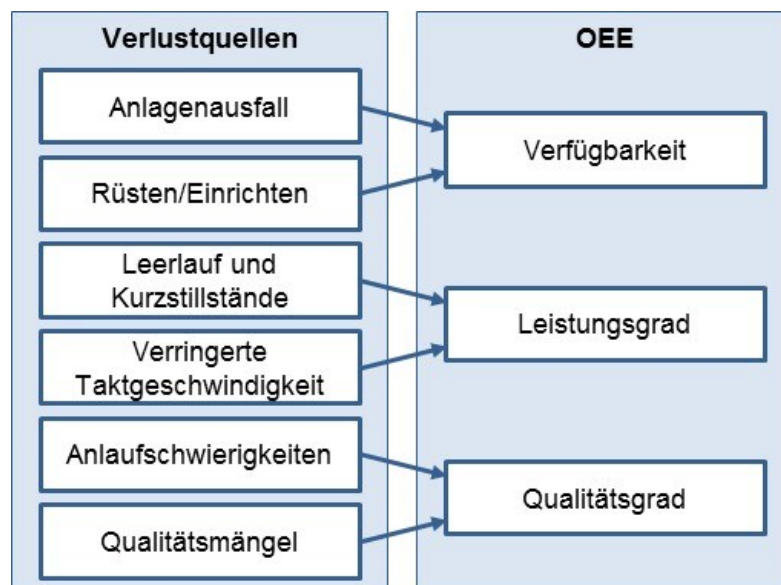


Abbildung 34: Zuordnung der Verlustquellen³⁵⁵

Für eine tiefere Analyse und die Strategieentwicklung wurden Effektivitätsportfolios entwickelt. Durch die Gegenüberstellung von jeweils zwei Verlustquellen mit Hilfe der Portfoliotechnik³⁵⁶ werden Felder gebildet, in denen die Anlage eingeordnet wird. Je nach Positionierung der Anlage werden Normstrategien empfohlen. Die Einheiten der Achsen sind in % angegeben. Dies lässt eine Berechnung in Stunden oder einer monetären Einheit zu. Gemeinsam bilden die Werte der x- und y-Achse 100% und geben die Verteilung der Verlustquellen an. Die Blasenfläche gibt den Gesamtwert der Störungen in Stunden oder einer monetären Einheit wieder.

³⁵⁵ Quelle: In Anlehnung an Al-Radhi, M. (2002), S. 16

³⁵⁶ Vgl. Huch, B. et al. (1995), S. 384 ff.

Verfügbarkeitsportfolio

Im Verfügbarkeitsportfolio stehen sich die Perspektiven Anlagenausfall und Rüsten/Einrichten gegenüber (siehe Abbildung 35).

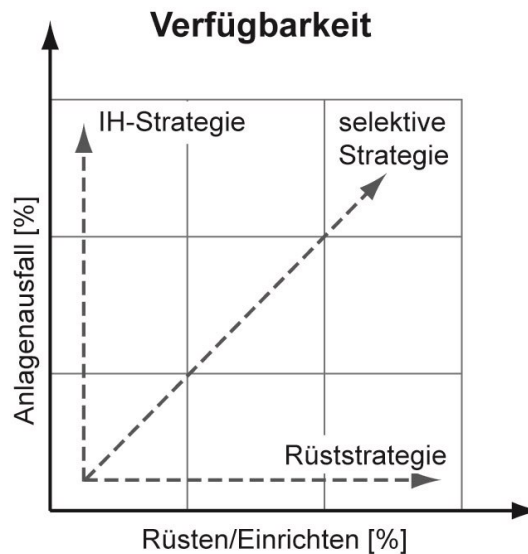


Abbildung 35: Effektivitätsportfolio Verfügbarkeit

Zu den Anlagenausfällen zählen maschinenabhängige und maschinenunabhängige Ausfälle. Maschinenabhängige Ausfälle sind beispielweise mechanische, elektrische, pneumatische oder hydraulische Ausfälle. Ausfälle, die durch fehlendes Material, Werkzeug, Hilfsstoffen, etc. entstehen, gehören zu den maschinenunabhängigen Ausfällen.³⁵⁷

Die Zeit, die für das Umrüsten einer Anlage für ein neues Produkt benötigt wird, ist in den Rüstverlusten enthalten. Zu dieser Kategorie zählt ebenfalls die Zeit zum Einrichten, bis ein Produkt der erforderlichen Qualität entspricht.³⁵⁸

Diese Verlustquellen können in Stunden aufgenommen werden. Überwiegen die Stunden der Anlagenausfälle, ist es ratsam eine neue Instandhaltungsstrategie zu entwickeln. Die Stillstände müssen verringert werden. Dies kann beispielsweise durch TPM, autonome Instandhaltung oder Condition Monitoring geschehen. Detailliertere Ausarbeitungen der Maßnahmen folgen in Abschnitt 5.3.2. Wird die Anlage im rechten unteren Eck eingeordnet, dann sind die Verluste auf das Rüsten und Einrichten zurückzuführen. In diesem Fall sollte die Rüststrategie überdacht werden. Liegt die Anlage in der Mitte kommt eine selektive Strategie zum Einsatz.

Leistungsgradportfolio

Mit den Verluststunden, die den Leistungsgrad herabsetzen, wird die Anlage in diesem Portfolio positioniert. Dafür werden die Verluste durch eine verringerte Taktgeschwindigkeit, Leerlauf und die Kurzstillstände herangezogen, welche die Achsen dieses Portfolios bilden. Das Portfolio ist in Abbildung 36 dargestellt.

³⁵⁷ Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 100

³⁵⁸ Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 100

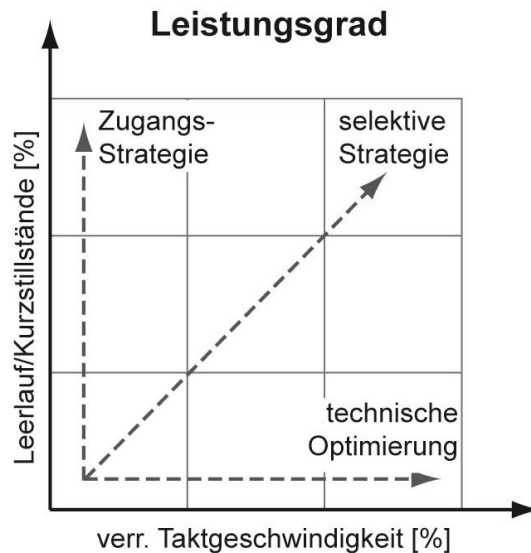


Abbildung 36: Effektivitätsportfolio Leistungsgrad

Zu Kurzstillständen werden Unterbrechungen gezählt, die kürzer als fünf Minuten dauern und keine Inspektion durch Instandhaltungspersonal erfordern. Leerlauf entsteht durch den Mangel an Materialien. Die Maschine wäre betriebsbereit, muss jedoch warten.³⁵⁹

Jene Ereignisse, die die Anlage abhalten mit maximaler Geschwindigkeit zu fertigen, fallen unter den Begriff der verringerten Taktgeschwindigkeit. Das bedeutet, der Prozess kann nicht mit minimaler Zykluszeit ablaufen.³⁶⁰

Befindet sich die Anlage oben links im Portfolio, dann gewinnen die Kurzstillstände und Leerläufe die Oberhand. In diesem Fall muss der Zugangs- bzw. Zulieferprozess überdacht werden. Dies könnte mit einem Pufferlager oder neu strukturiertem Produktionsprogramm gelöst werden. Kurzstillstände betreffen eventuell die Instandhaltungsstrategie. Befindet sich das Aggregat in der gegenüberliegenden Ecke, können technische Optimierungen die Verlustzeiten verringern.

Qualitätsrateportfolio

Der dritte Faktor der Gesamtanlageneffektivität ist die Qualitätsrate. Sie verändert die Produktionskennlinie nicht. Eine Steigerung derselben führt jedoch zu einer Verbesserung der OEE. Die Qualitätsrate ergibt sich durch Qualitätsmängel und Anlaufschwierigkeiten, welche das Spannungsfeld dieses Portfolios bilden (siehe Abbildung 37).

Bei Anlaufschwierigkeiten kann die Anlage nicht die volle Stückzahl produzieren, wodurch ein Zeitverlust entsteht. Dies bezieht sich zum Beispiel auf den Schichtbeginn oder einer neuen Inbetriebnahme, wenn sich die Anlage beispielsweise noch nicht auf Betriebstemperatur befindet, oder aufgrund fehlender Maßhaltigkeit.³⁶¹ Dadurch können Qualitätsmängel an den Halbzeugen verursacht werden.

³⁵⁹ Vgl. Schenk, M. (2009), S. 83

³⁶⁰ Vgl. Schenk, M. (2009), S. 83

³⁶¹ Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 88

Qualitätsmängel sind Verluste, die durch Ausschuss oder Nacharbeit entstehen. Die Teile weisen nicht die erforderliche Qualität auf und werden deswegen aussortiert oder müssen nachbearbeitet werden. In diesem Fall durchläuft das Produkt den Prozessschritt erneut.³⁶²

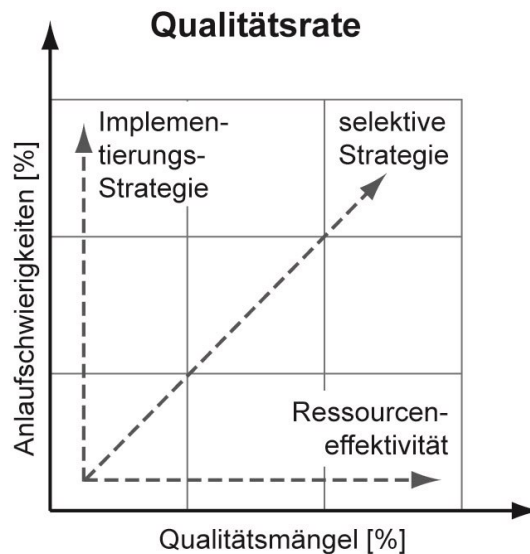


Abbildung 37: Effektivitätsportfolio Qualitätsrate

Dominieren die Verluste aus Anlaufschwierigkeiten, sollte die Inbetriebnahme besser geplant oder vorbereitet werden. Diese Punkte sind unter der Implementierungsstrategie zusammengefasst. Sind im Gegensatz dazu die Qualitätsmängel vorherrschend, ist es ratsam die Ressourcen wie Personal und Anlage effektiver zu gestalten. Dies beinhaltet zum Beispiel Schulungen für Mitarbeiter oder Wartung und Einstellungen bei Anlagen.

5.3.2 Maßnahmen zur Effektivitätssteigerung

Aus den Effektivitätsportfolios sind Normstrategien ableitbar. Um diese zu verfolgen gilt es Maßnahmen festzulegen und umzusetzen, wodurch die gewünschte Verbesserung erreicht wird. Diese Maßnahmen betreffen nicht nur eine Einzelanlage auf der operativen Ebene. Die Systemgrenze wird um strategische Entscheidungen erweitert und die Maßnahmen können Einzelanlagen, Anlagenverbunde oder den gesamten Produktionsbereich betreffen um einen ganzheitlichen Managementansatz zu verfolgen.

Für die Auswahl und Erarbeitung der richtigen Maßnahmen eignen sich Methoden aus dem Qualitätsmanagement wie die Seven Tools oder Seven New Tools. In Tabelle 8 sind die Instrumente aufgelistet.

Der Schwerpunkt der Seven Tools liegt in der Datenerfassung und Problemanalyse, die Seven New Tools behandeln die Lösungssuche, die Lösungsbewertung und die Planung und Realisierung.³⁶³

³⁶² Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 88

³⁶³ Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 659 ff.

Tabelle 8: Instrumente des Qualitätsmanagements³⁶⁴

Seven Tools	Seven New Tools
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlersammelliste • Qualitätsregelkarte • Histogramm • Paretdiagramm • Korrelationsdiagramm • Brainstorming • Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Affinitätsdiagramm • Relationendiagramm • Portfolio • Baumdiagramm • Matrixdiagramm • Netzplan • Problementscheidungsplan

Weitere Ausführungen zu diesem Thema geben JÖBSTL³⁶⁵, FREHR³⁶⁶ und EBEL³⁶⁷.

Folgende Maßnahmen können beispielhaft zu einer Optimierung führen.

Instandhaltungsstrategien

„Instandhaltung ist als wichtige Maßnahme für die Reduzierung von Durchlaufzeiten zu sehen, da durch sie Stillstandszeiten der zum Durchlauf der Prozessschritte notwendigen Betriebsmittel vermieden werden.“³⁶⁸

Bei der **präventiven Instandhaltung** sollen Stillstandszeiten während der Maschinenlaufzeit vermieden und vor dem Ausfall der Maschine durchgeführt werden. Dafür ist es wichtig die Ausfallzeiten bestmöglich berechnen und prognostizieren zu können, sodass rechtzeitig vor dem erwarteten Ausfall Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Dieselben sollen durch intensive Planung der IH-Aktivitäten, Kommunikation mit dem Produktionsbereich und Berücksichtigung der Produktionsplanung abgestimmt und durchgeführt werden. Diese Strategie führt weg vom stochastischen Charakter der Ausfallzeiten hin zum deterministischen Charakter geplanter Anlagenstillstände.³⁶⁹

Bei der **autonomen Instandhaltung** liegt die Verantwortung für den Anlagenzustand nicht mehr allein bei den Instandhaltern, sondern auch bei den Mitarbeitern der Produktion. Diese sind nicht mehr nur für die Produktion verantwortlich, sondern deren Aufgabenfeld entwickelt sich vom klassischen Entstörer zum Vorbeuger. Sie übernehmen Verantwortung für den Anlagenzustand.³⁷⁰

Der Abnutzungsvorrat eines Instandhaltungsobjektes wird bei der **zustandsabhängigen Instandhaltung** bestmöglich ausgenutzt. Durch Inspektionen in bestimmten Intervallen oder permanent (Condition Monitoring) wird der Zustand des Objektes erfasst und überprüft. Dadurch kann die Anlage bis zur Schadens- oder Ausfallgrenze genutzt werden. Die Inspektion ermöglicht

³⁶⁴ Vgl. Kamiske, G. F. (2012), S. 659 ff.

³⁶⁵ Siehe Jöbstl, O. (1999), S. 43 ff.

³⁶⁶ Siehe Frehr, H.-U. (1993), S. 237 ff.

³⁶⁷ Siehe Ebel, B. (2001), S. 244 ff.

³⁶⁸ Zäpfel, G. (1993), S. 51; zitiert nach Thun, J.-H. (2013), S. 91

³⁶⁹ Vgl. Rasch, A. A. (2000), S. 89; vgl. Thun, J.-H. (2013), S. 91

³⁷⁰ Vgl. Lindinger, C.; Zeisel, N. (2013), S. 191 f.

des Weiteren eine kurzfristige Planung der Maßnahmen. Dadurch kann die Verfügbarkeit gesteigert werden.³⁷¹

Condition Monitoring und „Schwingungsanalyse“ werden oftmals gleich gesetzt. Jedoch ist die Schwingungsanalyse neben anderen Methoden, wie beispielsweise Thermografie-, Drehmoment-, Lage-, Schmierstoff- oder Ultraschallüberwachung eine Methode der Zustandsüberwachung. Diese Methoden werden bei Schadensdiagnosen, Früherkennung von Schäden und Prognosen der Schadensverläufe eingesetzt.³⁷²

Im Instandhaltungsmanagement werden durch den Einsatz dieser Technologien die System- und Maschinenverfügbarkeit gesteigert, ungeplante Reparaturzeiten und Stillstandszeiten reduziert, Wartungsintervalle, Anlagenproduktivität, -sicherheit und -lebensdauer erhöht. Insbesondere durch die bestandssenkende zustandsorientierte Ersatzteilbereitstellung können die direkten Instandhaltungskosten gesenkt werden.³⁷³

SMED

SMED ist die Abkürzung für Single Minute Exchange of Die. Dies bedeutet, dass Rüstvorgänge auf ein Minimum reduziert werden sollen. SHINGO, der Entwickler dieser Methode, legt ein Minimum von unter zehn Minuten fest. Die Minutenanzahl der Rüstdauer darf nur eine Ziffer betragen. In vielen Fällen scheint dies unmöglich, jedoch in vielen von diesen ist es möglich.³⁷⁴

SMED basiert auf dem Gedanken möglichst viel Zeit beim Rüsten durch Vorbereitung einzusparen. Die Rüstzeit kann dafür in zwei Arten eingeteilt werden: (1) interne Vorgänge und (2) externe Vorgänge. Letztere können während des Betriebes der Maschine durchgeführt werden (außerhalb der Umstellzeit). Für die Durchführung von internen Vorgängen muss die Maschine still stehen (innerhalb der Umstellzeit).³⁷⁵

Die Methode sieht drei Phasen vor. In der ersten Phase werden die Vorgänge in interne und externe unterteilt. In Phase zwei soll versucht werden die internen Vorgänge in externe umzuwandeln. Dafür müssen die Vorgänge modifiziert werden, sodass diese extern durchgeführt werden können. In der letzten Phase sollen beide Typen von Vorgängen verkürzt und in eine logische Abfolge gebracht werden.³⁷⁶

Technische Einstellungen

Um den Leistungsgrad und die Qualitätsrate zu verbessern, müssen technische und organisatorische Maßnahmen umgesetzt werden. Diese können sehr vielfältig sein. Es können zum Beispiel die Anlagenparameter falsch auf den Arbeitsvorgang und das Material eingestellt sein. Des Weiteren sollten diese Parameter auf die Taktzeit abgestimmt sein. Ebenfalls können Korrosion und

³⁷¹ Vgl. Rasch, A. A. (2000), S. 90 f.

³⁷² Vgl. Martin, W. (2006), S. 54

³⁷³ Vgl. Willmott, P. (2002), S. 16

³⁷⁴ Vgl. Shingo, S. (1985), S. xix

³⁷⁵ Vgl. Blom Product Development Team (2007), S. 20 f.

³⁷⁶ Vgl. Blom Product Development Team (2007), S. 20 f.

Verschleiß an Lagern, Wellen, Antrieben oder ähnlichen Bauteilen die Ursache für Leistungsverluste sein, die durch die vorher beschriebenen IH-Maßnahmen behoben werden können.³⁷⁷

Schulung und Training der Mitarbeiter

Großes Potenzial für die Verbesserung der Qualität sowohl in Hinsicht des Prozesses und des Produktes liegt in der Ausbildung der Mitarbeiter. In der Instandhaltung beispielsweise sollten die Mitarbeiter über die Fähigkeiten und Fertigkeiten des instandhaltungsspezifischen Methodenwissens verfügen, Diagnosen und Ableitungen deuten und das notwendige technologische Gesetzeswissen erheben können.³⁷⁸

Qualitätsmanagement

Ein integriertes Qualitätssicherungssystem und ein optimales Qualitätsmanagement schaffen Abhilfe gegen Nacharbeit und Ausschuss, welche die Qualitätsrate schwächen.³⁷⁹

Die Analyse durch die Effektivitätsportfolios und die Ableitung der Maßnahmen zur Verbesserung der Anlageneffektivität betreffen die Anlage und gehören zur rechten Seite der Analysepyramide (siehe Abbildung 33). Die nachstehend angeführte Abweichungsanalyse und die Methoden der Auftragsfreigabe können der linken Seite der Pyramide zugeordnet werden und betreffen den Bestand.

5.3.3 Abweichungsanalyse

Die Produktionskennlinie zeigt einen idealen Bestandwert an, welcher nach Wunsch des Grades der Auslastung angepasst werden kann. Nun gilt es den idealen mit dem derzeitigen durchschnittlichen Bestand zu vergleichen. Dazu wird eine Abweichungsanalyse durchgeführt.

Diese dient zur Kontrolle, inwieweit der Soll-Wert tatsächlich erreicht wurde. Decken sich die beiden Werte bzw. liegt der Ist-Bestand im Toleranzbereich, ist das Ergebnis zufriedenstellend und es müssen keine Maßnahmen eingeleitet werden. Ist die Abweichung der beiden Werte zu groß, muss nach Ursachen geforscht und es müssen Handlungen zur Verbesserung veranlasst werden. Diese Analyse bildet die Grundlage für Lernprozesse, um diese Erfahrungen für zukünftige Ereignisse verwenden zu können. Dafür ist eine Rückkopplung der Ergebnisse und Auswirkungen erforderlich.³⁸⁰

5.3.4 Auftragsfreigabe

Ist die Differenz zwischen Soll- und Ist-Bestand zu groß, muss etwas geändert werden. In den meisten Fällen liegt mehr Material als notwendig vor der Anlage und wartet auf die Bearbeitung. Auch wenn zu wenig Bestand vorherrscht und die Anlage aus diesem Grund nicht bedient werden kann, besteht Handlungsbedarf. Eine Möglichkeit den Bestand vor der Anlage zu regulieren ist die Art der Auftragsfreigabe anzupassen.

³⁷⁷ Vgl. Strunz, M. (2012), S. 634

³⁷⁸ Vgl. Biedermann, H. (2015), S. 46

³⁷⁹ Vgl. Strunz, M. (2012), S. 637

³⁸⁰ Vgl. Corsten, H.; Reiß, M. (1989), S. 618

Wie auf der Seite der Anlage umfasst die letzte Ebene der Analysepyramide auch auf der Seite des Bestandes mehr als nur die Einzelanlage. Die Art bzw. Methode der Auftragsfreigabe kann einzelne Prozesse, Fertigungslinien oder den gesamten Fertigungsbereich betreffen. Dies wird in die Arbeit aufgenommen, da die Regulierung der Bestände durch die Produktions- und Auftragsplanung geschieht.

Unter Auftragsfreigabe ist die Bestimmung von Zeitpunkt und Reihenfolge der Freigabe von Aufträgen für die Fertigung zu verstehen. Damit werden der Ist-Zugang zur Fertigung und dadurch die Größen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung beeinflusst. Ziel der Auftragsfreigabe kann je nach Ausprägung einerseits die genaue Umsetzung der Produktionsplanung sein, oder die Bestandsregelung in der Fertigung. In diesem Fall liegt der Fokus auf den Verfahren zur Bestandsregelung. Darunter fallen beispielsweise die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe, Conwip, oder die Dezentrale Bestandsorientierte Auftragsfreigabe.³⁸¹

Belastungsorientierte Auftragsfreigabe

Ein Kernelement der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) ist das Durchlaufdiagramm (Abschnitt 3.7) bzw. das Plan-Durchlaufdiagramm (siehe Abbildung 38). Ausgegangen wird dabei vom Endbestand (Restbestand) der vorigen Periode. Betrachtet wird ein einzelner Arbeitsplatz. Für das weitere Vorgehen wird ein zukünftiges ideales Durchlaufdiagramm erstellt. Dabei verlaufen die Zugangskurve und die Abgangskurve parallel zueinander und ergeben dadurch den mittleren Planbestand.³⁸²

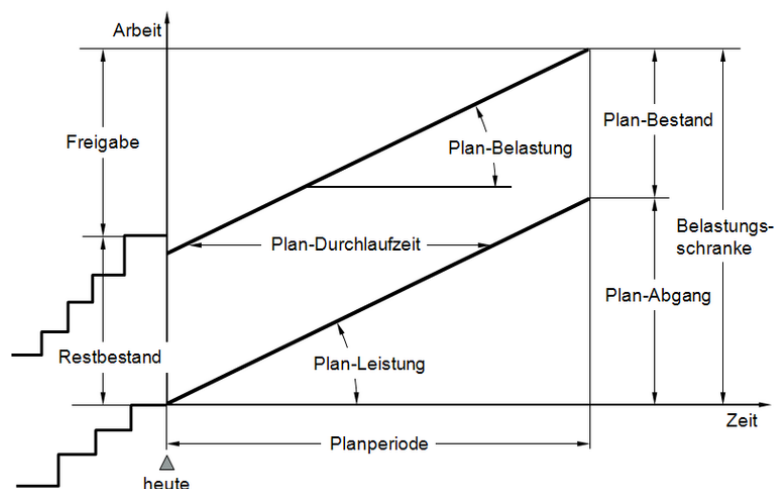


Abbildung 38: Durchlaufmodell der BOA³⁸³

Des Weiteren werden eine festgelegte Planleistung und eine mittlere Plandurchlaufzeit definiert. Ist der Restbestand größer als der Planbestand darf in der nächsten Periode nicht so viel Arbeit für diese Anlage freigegeben werden. In Summe dürfen der Restbestand und die freigegebenen Aufträge so hoch wie der Planabgang plus dem mittleren Bestand sein. Die Summe aus mittlerem

³⁸¹ Vgl. Lödding, H. (2008), S. 227

³⁸² Vgl. Wiendahl, H.-P. (1991), S. 16

³⁸³ Quelle: Wiendahl, H.-P., <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Fertigungssteuerung/Belastungsorientierte-Auftragssteuerung> (Zugriff: 15.07.2015)

Planbestand und Planabgang wird als Belastungsschranke bezeichnet. Die Differenz zwischen Belastungsschranke und Restbestand heißt Freigabe. Der Unterschied zu anderen Verfahren, die versuchen die Abgangskurve genau zu planen, liegt in der periodenweisen Bilanzbetrachtung des Bestandes aufgrund voraussichtlicher Zu- und Abgänge.³⁸⁴

Conwip

Conwip ist eine Weiterentwicklung von Kanban und setzt sich aus Constant Work in Progress zusammen. Dies bezeichnet den Kern dieses Verfahrens. Dabei werden Ansätze des Pull- und Push-Systems eingesetzt.³⁸⁵ Es ist anzumerken, dass die Voraussetzung für dieses Verfahren die Produktion entlang einer Route innerhalb des Bereiches ist. Es wird ein Limit für den WIP festgelegt, der WIP-Grenzwert, welcher nicht überschritten werden darf. Ziel ist die Einhaltung eines konstanten Bestandes im System.³⁸⁶ Dafür wird ein neuer Auftrag erst freigegeben, wenn ein anderer mit gleichem Arbeitsaufwand das System verlassen hat. Wie beim Kanban werden dafür Regelkarten verwendet. Im Gegensatz zum Kanban bezieht sich der Steuerungskreis auf einen Fertigungsbereich und nicht auf ein einzelnes Arbeitssystem. Der Bestand wird pro Fertigungsbereich gesteuert und nicht pro Material. Der dritte Unterschied entsteht dadurch, dass eine Priorisierung von Kunden- und Planaufträgen in die Planung miteinbezogen werden kann.³⁸⁷ Die Conwip-Regelkarte begleitet den Auftrag durch den gesamten Fertigungsbereich. Wurde der Auftrag an der letzten Anlage fertiggestellt, wird die Karte frei und an den Anfang gesendet.³⁸⁸ Danach wird geprüft, ob genügend Umlaufbestand abgebaut wurde, sodass der nächste Auftrag eingelastet werden kann und dabei der Grenzwert nicht überschritten wird. Für die Einlastung können verschiedene Prioritätsregeln verwendet werden. Im klassischen Conwip-Modell wird nach dem frühesten Liefertermin gereiht.³⁸⁹

Hybride-Kanban-Conwip-Steuerung

Das Konzept dieses Fertigungsverfahrens liegt darin, die dezentrale Bestandsregelung der Kanban-Steuerung und die zentrale Bestandsregelung der Conwip-Steuerung zu vereinen. Dieses Verfahren wurde von BONVIK, COUCH und GERSHWIN³⁹⁰ entwickelt und durch Simulationsstudien geprüft. Die Autoren schränken das Modell insofern ein, dass nur eine Variante gefertigt werden kann. In diesem Fall wird vernachlässigt, dass es in der Kanban-Steuerung variantenspezifische Bestandspuffer gibt und diese Aufträge erzeugt. Hingegen werden bei Conwip variantenneutrale Puffer eingesetzt und dieses Verfahren gibt Aufträge frei. Diese Vereinfachung wirkt sich negativ auf die Praxistauglichkeit aus, simplifiziert aber dadurch die mathematische Modellierung und Simulation. In den Simulationsuntersuchungen hat das hybride Modell bei vergleichbarem Bestand eine höhere Leistung als bei den anderen beiden Verfahren erzielt.³⁹¹

³⁸⁴ Vgl. Wiendahl, H.-P. (1987), S. 208 f.

³⁸⁵ Vgl. Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2004), S. 139

³⁸⁶ Vgl. Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2001), S. 349

³⁸⁷ Vgl. Jodlbauer, H. (2008), S. 225

³⁸⁸ Vgl. Framinan, J. M. et al. (2003), S. 256

³⁸⁹ Vgl. Jodlbauer, H. (2008), S. 226

³⁹⁰ Bonvik, A. M. et al. (1997)

³⁹¹ Vgl. Lödding, H. (2004), S. 233

Bei der Hybride-Kanban-Conwip-Steuerung werden zwei Arten von Regelkarten verwendet. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, gibt es Conwip-Regelkarten, die den Grenzwert des Bestandes des gesamten Fertigungsbereiches steuern. Damit wird garantiert, dass der Bestand unter dem Grenzwert bleibt. Zwischen den einzelnen Arbeitsstationen werden Kanban-Regelkarten verwendet, die den Bestand pro Station regulieren. So wird ein Auftrag erzeugt, wenn dieser durch eine Kanban-Karte verlangt wird und durch eine Conwip-Regelkarte freigegeben wurde.³⁹² In Abbildung 39 wird der Ablauf schematisch gezeigt.

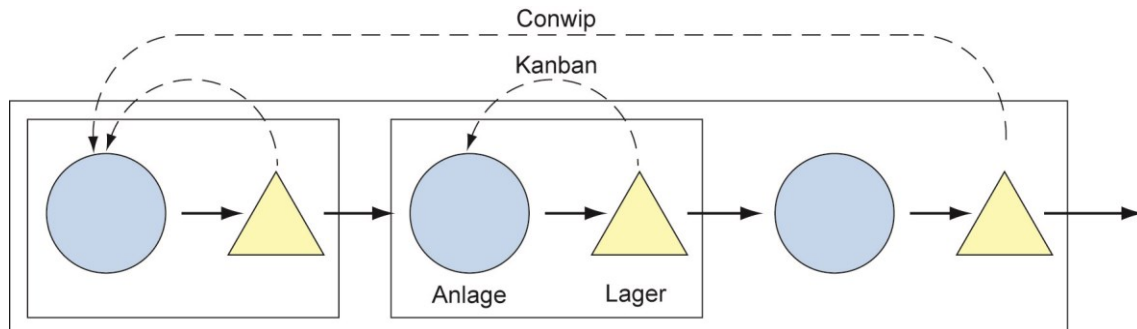


Abbildung 39: Produktionslinie mit hybrider Kanban-Conwip-Steuerung³⁹³

LÖDDING beschreibt die Übertragung der Verfahrensregeln auf die Situation mehrerer Varianten. Durch Regelkarten für jede Variante bleibt der variantenspezifische Puffer der Kanban-Steuerung erhalten.³⁹⁴

Dezentrale Bestandorientierte Fertigungsregelung

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Auftragsfreigabeverfahren ist die Dezentrale Bestandorientierte Fertigungsregelung (DBF) bei variantenreichen Produktionen anwendbar, was den größten Vorteil derselben darstellt. Die Basis der DBF bilden dezentrale Bestandsregelkreise zwischen den Arbeitssystemen der Fertigung. Ausgangspunkt ist eine Liste mit dringenden Aufträgen, die von einem Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (PPS-System) generiert wird. Dafür können beliebige Methoden angewendet werden. Über dezentrale Bestandsregelkreise werden diese Aufträge für die Fertigung freigegeben. Dabei wird jeder Arbeitsvorgang eines Auftrages von der DBF separat je nach Bestand der nachfolgenden Anlage freigegeben. Es finden Informationsflüsse in Richtung des Materialflusses und entgegengesetzt statt. Erstere aufgrund der Anfrage und letztere durch die Entscheidung ob der Auftrag bearbeitet werden darf. Das Konzept der DBF ist in Abbildung 40 dargestellt.³⁹⁵

³⁹² Vgl. Bonvik, A. M. et al. (1997), S. 794 f.

³⁹³ Quelle: In Anlehnung an Bonvik, A. M. et al. (1997), S. 795

³⁹⁴ Vgl. Lödding, H. (2004), S. 234 ff.

³⁹⁵ Vgl. Lödding, H. (2004), S. 423

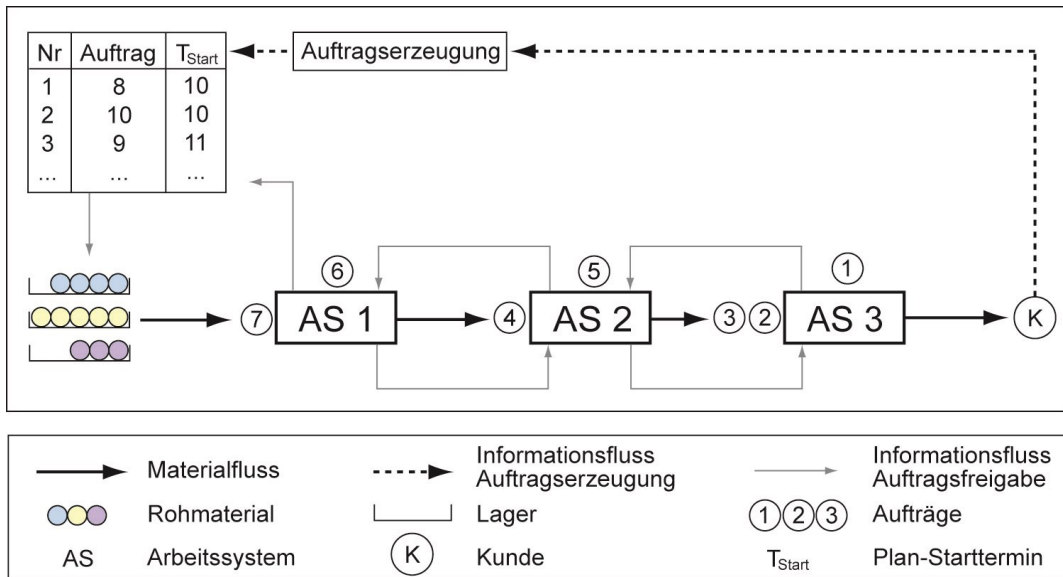


Abbildung 40: Konzept der Dezentralen Bestandsorientierten Fertigungsregelung³⁹⁶

Die Basis für die Fertigungssteuerung mit der DBF sind sechs Verfahrensregeln:³⁹⁷

1. Die Freigabe für die Bearbeitung eines Auftrages holt sich der Mitarbeiter vom nachfolgenden Arbeitssystem des betreffenden Auftrags. Die letzte Station im Bearbeitungsprozess muss nicht auf die Bearbeitungsfreigabe warten und darf den Auftrag immer bearbeiten.
2. Aufgrund der Bestandsgrenze trifft der Mitarbeiter der nachfolgenden Anlage die Entscheidung über die Freigabe des Auftrages. Wenn der Bestand an dieser Anlage und jener, welcher am Vorgängerarbeitssystem bearbeitet wird die Bestandsgrenze nicht übertreffen, erfolgt die Bearbeitungsfreigabe und dessen Auftragszeit wird zum Gesamtbestand addiert.
3. Erhält ein Arbeitssystem die Freigabe für einen Auftrag, wird dieser bearbeitet. Ansonsten fragt es bei anderen Arbeitssystemen um Bearbeitungsfreigabe nach, die weitere Aufträge des Bestandes betreffen.
4. Ist die Bearbeitung erfolgt, streicht der Mitarbeiter den Auftrag aus dem Gesamtbestand des Arbeitssystems. Wird dadurch der Grenzbestand unterschritten, erteilt der Mitarbeiter die Bearbeitungsfreigabe für weitere Aufträge bis die Grenze überschritten ist.
5. Jedes Arbeitssystem wird mit einer Positionsnummer versehen, die die relative Position des Systems im Materialfluss wiedergibt. Hat das nachfragende Arbeitssystem eine höhere Positionsnummer (bei einem Rückfluss), wird jedenfalls eine Bearbeitungsfreigabe erteilt, auch wenn die Bestandsgrenze überschritten ist.
6. Die Produktionsplanung erstellt die Liste mit dringenden Aufträgen. Diese Aufträge werden vom ersten Arbeitssystem freigegeben, sobald der Bestand desselben unter die Grenze fällt.

³⁹⁶ Quelle: In Anlehnung an Lödding, H. (2008), S. 424

³⁹⁷ Vgl. Lödding, H. (2004), S. 424 f.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Wirkmodell beschrieben. Es ist eine Kombination aus der Produktionskennlinie und der Gesamtanlageneffektivität. Die Faktoren Verfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsrate und der Gesamtwert OEE werden im Diagramm der Kennlinie dargestellt. Somit liegt der Schwerpunkt nicht allein am Bestand (ausgedrückt durch den idealen Bestand mittel der PKL), sondern auch die Anlage rückt in den Mittelpunkt der Betrachtung. Die Minimierung der Anlagenverluste, welche in die OEE einwirken, bewirkt eine Veränderung der Produktionskennlinie und somit des idealen Bestandes bzw. Bestandsbereiches. Diese Veränderungen werden durch einzelne Kennlinien im Diagramm dargestellt. Somit ist erkennbar, welche Auswirkungen Verbesserungen oder Verschlechterungen haben.

Eine der vier Leistungskennlinien im Modell drückt die Auswirkungen der Verbesserung der Verfügbarkeit aus. Diese befindet sich oberhalb der aktuellen Linie, da mehr Stunden pro Tag gefertigt werden können. Der ideale Bestand bleibt in diesem Fall gleich. Bei der Verbesserung des Leistungsgrades steigt die durchschnittliche Leistung nicht an, allerdings verändern sich die Krümmung aufgrund der Veränderung des Streckfaktors und der ideale Mindestbestand, wodurch sich der ideale Bestand reduziert. Somit ist diese Linie auf gleicher Höhe wie die aktuelle Leistungskennlinie, jedoch anders gekrümmt und ergibt einen niedrigeren idealen Bestand. Die Qualitätsrate wird ebenfalls im Modell dargestellt. Diese hat aber keinen Einfluss auf die Produktionskennlinie, da jene nicht unterscheidet, ob die Aufträge zum ersten Mal zufließen oder Nacharbeiten sind.

Mit diesem Wirkmodell wird gezeigt, wie weit der Bestand reduziert werden kann um eine Vollauslastung zu gewährleisten, wie gut oder schlecht die Gesamtanlageneffektivität und ihre Faktoren sind und wie sich eine Veränderung derselben auf die Kennlinie auswirkt. Damit wurde ein Teil der Haupt-Forschungsfrage beantwortet.

Um die Analysen zu vertiefen wurde eine Analysepyramide entwickelt, welche den modellbasierten Ansatz zur Implementierung optimaler Bestände und Optimierung der Anlageneffektivität darstellt und den zweiten Teil der Haupt-Forschungsfrage beantwortet. Die Analysepyramide ist in Abbildung 41 schematisch dargestellt.

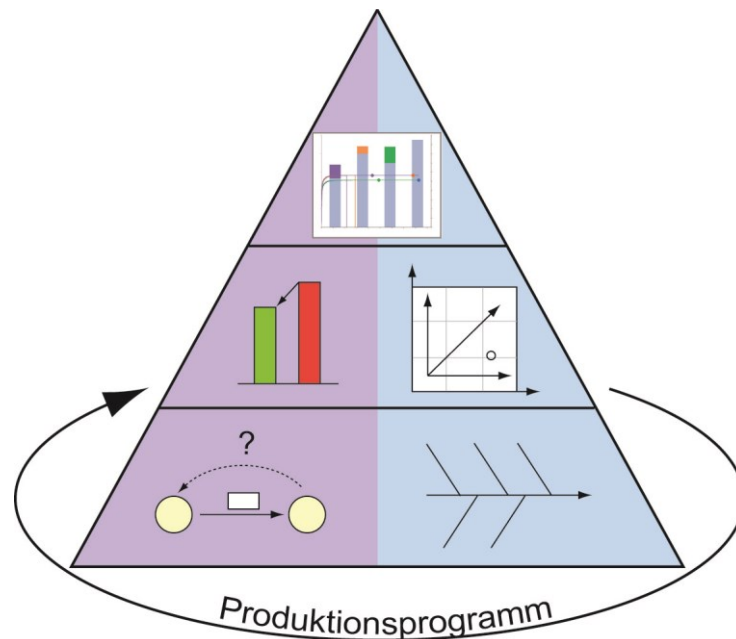


Abbildung 41: Modellbasierter Ansatz

An der Spitze befindet sich das neue Wirkmodell auf Basis der Produktionskennlinien und der OEE. Dieses bildet die Beschreibungs- und Erklärungsebene. Auf der zweiten Stufe, der Analyseebene, wird eine Abweichungsanalyse auf der Seite des Bestandes und die Analyse der Verlustquellen anhand der entwickelten Effektivitätsportfolios auf der Anlagenseite empfohlen. Auf der untersten Ebene (Optimierungsebene) soll das Verfahren der Auftragsfreigabe zur Implementierung des idealen Bestandes überdacht und die IH-Maßnahmen zur Verbesserung der Anlageneffektivität, erarbeitet und umgesetzt werden. Dabei können Qualitätswerkzeuge wie die Seven Tools oder Seven New Tools hilfreich sein.

Diese Analysen beziehen sich auf eine Anlage inklusive dem Stau- oder Pufferlager davor. Trotz der separaten Betrachtung der Aggregate ist das Produktionsprogramm der zusammenführende Faktor und für eine ganzheitliche Verbesserung und Abstimmung zu berücksichtigen.

6 Fallstudie zur Darstellung des entwickelten Modells

„Für das Können gibt es nur einen Beweis: das Tun.“

Marie von Ebner-Eschenbach (1830-1916), österreichische Schriftstellerin

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Umsetzung des Modells aussehen kann. Gezeigt wird dies am Beispiel der Austria Metall AG (AMAG), einem Unternehmen in der Prozessindustrie. Dazu wird die AMAG vorgestellt, die Ausgangssituation beschrieben und die Zielsetzung klar definiert. Nachdem das Untersuchungsdesign gezeigt wird, werden die Ergebnisse erläutert und diskutiert. Das Kapitel endet mit einem Resümee.

6.1 Ausgangssituation

Die AMAG produziert hochwertige Aluminiumprodukte für die Weiterverarbeitung in einer Vielzahl von Wachstumsbranchen. Sie besteht seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und ist Anbieter von Primäraluminium und Aluminiumhalbzeugprodukten in ausgewählten Märkten. Am Standort in Sept-Îles, Kanada, wird Primäraluminium erzeugt, womit die Wertschöpfungskette beginnt. In Ranshofen, Österreich werden Gusslegierungen und Walzbarren produziert. Dort erfolgen das Walzen und die thermische und mechanische Behandlung von Bändern, Blechen und Platten aus einer Vielzahl von Aluminiumlegierungen. Im Jahr 2014 betrug der Absatz rund 375.900 Tonnen und der Umsatz ca. € 823.000.000.³⁹⁸



Abbildung 42: Luftaufnahme AMAG Austria Metall AG

³⁹⁸ Vgl. AMAG Austria Metall AG (2015), S. 41

Am Standort Ranshofen befinden sich die AMAG Casting (Gießerei) und die AMAG Rolling (Walzwerk), wo Bänder, Bleche und Platten hergestellt werden, die in Branchen wie der Flugzeug-, Automobil-, Sportartikel-, Beleuchtungs-, Maschinenbau-, Bau- und Verpackungsindustrie eingesetzt werden. Eine Luftaufnahme des Standorts in Ranshofen ist in Abbildung 42 zu sehen. Die Stärke und gleichzeitige Herausforderung liegt in der großen Produktvielfalt und unterschiedlichen Anforderungen an die Produkte. Rund 25 strategische Geschäftseinheiten (SGE) mit insgesamt ca. 15.000 verschiedenen Varianten gehören zum Sortiment. Dies macht die Herstellung sehr komplex.

Prozessablauf

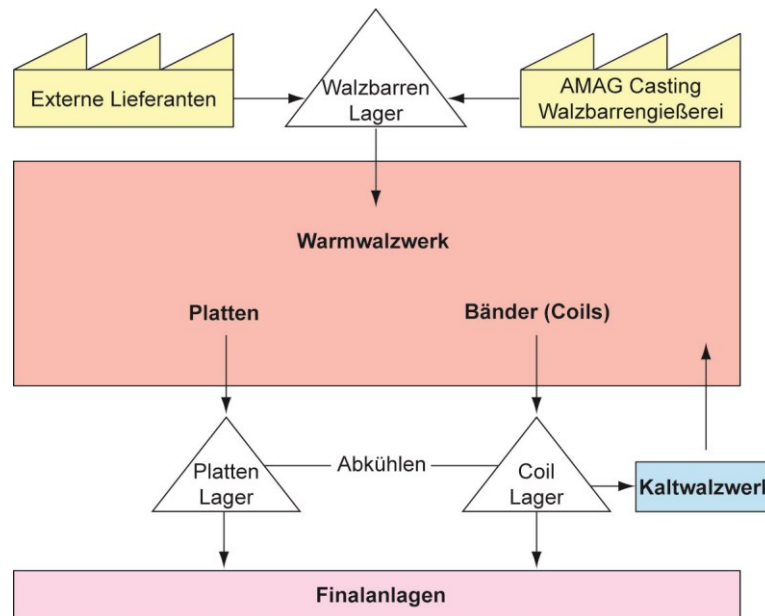


Abbildung 43: Prozessablauf AMAG Rolling³⁹⁹

Das Walzwerk kann grob in die Bereiche Warmwalzwerk (Warmduo, Warmquarto, Plattenscheren), Kaltwalzwerk (Kaltquarto, Glanzduo) und Finalanlagen (Längsteilscheren, Streckrichtanlage, Recker, Querteilanlagen) eingeteilt werden. Abbildung 43 zeigt schematisch den Prozessablauf. Die Barren, die zwischen Gießerei und Walzwerk in einem Pufferlager gelagert werden, kommen nachdem sie auf die korrekte Länge gebracht und die Oberfläche mittels der Blockfräse plan gefräst wurden, in den Blockstoßofen. Dort werden sie auf die richtige Bearbeitungstemperatur gebracht. Die Zeit im Ofen und die Temperatur differiert je nach Barrentyp. Danach werden die Barren an den Warmwalzgerüsten (Warmduo und Warmquarto) gewalzt. Diese Aggregate können in beide Richtungen betrieben werden, d.h. sie sind reversierend. Haben die Bänder noch nicht die erforderliche Dicke, werden sie in der entgegengesetzten Richtung nochmals gewalzt. Nach diesem Arbeitsgang verläuft die Herstellung von Platten und Bändern unterschiedlich.

Bänder und Bleche werden nach dem Warmwalzen kaltgewalzt. Im Gegensatz zum Warmwalzgerüst können die Bänder im Kaltquarto nur in eine Richtung gewalzt werden. Muss ein Band mehrmals das Kaltquarto durchlaufen, kommt es auf ein Karussell, welches das Band nach vorne

³⁹⁹ Quelle: In Anlehnung an Rainer, C. (2010), S. 10

Hier wird ein Los nicht wie es die Definition besagt „ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produktarten erzeugt“⁴⁰². Die Teillose eines Loses werden, wenn möglich, hintereinander auf einer Anlage abgearbeitet, dies muss aber nicht sein. Beispielsweise kann ein Los aus Teillosen bestehen, die unterschiedlich verarbeitet werden. Die Disponenten versuchen die Abarbeitungsreihenfolge rüsto optimiert zu planen und Kampagnen aus Teillosen mit gleichen Eigenschaften zusammenzusetzen.

Die Auftragsfreigabe des gesamten Fertigungsprozesses richtete sich zu Beginn des Projektes nach den Kapazitäten und den Zusammenstellungen der Varianten in den Öfen am Start der Warmlinie. Es wurde versucht, die Kapazitäten der Öfen voll auszuschöpfen. Dadurch entstanden „Wellen“ an gleichen Typen, die durch die Produktion gedrückt wurden. Deswegen häuften sich vor einigen Anlagen die Bestände. Um termingerecht fertigen zu können wurden Eilaufträge generiert und jene Aufträge vorgezogen. Das hatte zusätzliches Rüsten und lange Durchlaufzeiten der anderen Aufträge zur Folge.

6.2 Zielsetzung

Innerhalb des Fertigungsprozesses füllten sich die Stauläger vor den Anlagen mit hohen Beständen. Diesen zu hohen Bestandsniveaus sollte mit Hilfe des Wirkmodells entgegengewirkt werden. Um die optimale Menge an Bestand zu berechnen und implementieren zu können, sowie den Ist-Wert und die Auswirkungen der Gesamtanlageneffektivität sichtbar zu machen, wurde das Modell entwickelt und eingesetzt.

Das Modell soll die Disponenten unterstützen den passenden Bestandslevel zu definieren. Nach dem Projekt soll das Modell in das vor Ort verwendete Planungstool und somit ins PPS-System eingebettet werden, indem der errechnete ideale Bestandsbereich angezeigt wird. Mittels Ampelsystem sollen die Planer aufmerksam gemacht werden, ob sich der Bestand aufgrund der Einplanung der Aufträge im zulässigen Bereich befindet.

Im Marktsegment, in dem sich die AMAG befindet, ist eine große Produktvielfalt erforderlich um bestehen zu können und sich gegen Wettbewerber durchzusetzen. Je nach Variante durchlaufen die Aufträge unterschiedliche Routen in der Produktion, weswegen es eine Vielzahl unterschiedlicher Produktionsabläufe gibt. Dies ist der Grund für die separate Analyse der einzelnen Anlagen.

6.3 Untersuchungsdesign

Zu Beginn des Projektes wurden die Systemgrenzen und der Projektumfang festgelegt. Die Frage, welche Anlagen analysiert werden sollen, wurde geklärt. Im Speziellen lag der Fokus auf den Finalanlagen wie beispielsweise den Längsteilscheren, da diese Engpässe darstellten. Diese waren die ersten Anlagen an denen das Analysemodell entwickelt und getestet wurde. Im Zuge des Projektes wurde das Modell an allen definierten Anlagen im Walzwerk angewandt.

Das Vorgehen des Projektes, eingebettet im PDCA-Zyklus, ist in Abbildung 45 dargestellt.

⁴⁰² Voigt, K.-I., <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/58091/los-v5.html> (Zugriff: 07.07.2015)

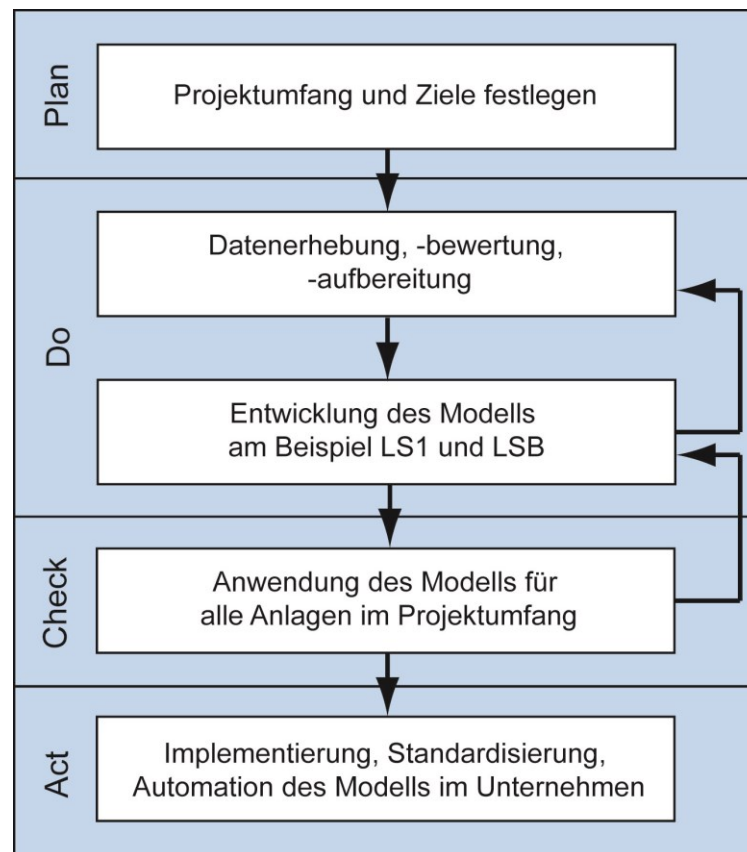


Abbildung 45: Vorgehensmodell

Über den Erfolg der Ergebnisse entscheidet unter anderem die Qualität der Daten. Die Zuverlässigkeit und Gültigkeit derselben sind Voraussetzung für eine gute Analyse.⁴⁰³ Deswegen müssen diese erhoben, bewertet und aufbereitet werden. Dies nahm im Projekt einige Zeit in Anspruch. Es wurden Daten aus der Betriebsdatenerfassung (BDE) und anderen Systemen wie dem Schichtplan herangezogen. Die Daten aus den unterschiedlichen Quellen stimmten zum Teil nicht überein. Ein Grund dafür war beispielsweise, dass die Daten im Schichtplan händisch eingegeben wurden. Teilweise melden die Mitarbeiter die Daten erst zu Schichtende gesammelt und nicht pro Auftrag, wodurch Ungenauigkeiten entstehen. Deswegen wurden die Daten miteinander verglichen, auf Plausibilität überprüft, kombiniert und abgestimmt. In Zukunft sollen die Daten gewissenhafter und genauer eingetragen werden.

Nach der Datenaufbereitung konnten die Produktionskennlinien erstellt werden. Dazu mussten dieselben an die realen Gegebenheiten angepasst, bzw. mussten die Parameter wie in Abschnitt 4.4 beschrieben definiert werden. In diesem Anwendungsfall war die Berechnung des Streckfaktors α_1 laut Gleichung (4.15) in Abschnitt 4.4.3 nicht möglich. Die Ergebnisse, die mittels der Gleichung erreicht wurden, waren nicht plausibel. Deswegen wurde der Streckfaktor empirisch in Verbindung mit der Belastungsstreuung ermittelt. Des Weiteren wurde bei einigen Anlagen ein C_{Norm} -Funktionswert größer 0,25 eingesetzt. Dies ist auf die Kampagnenplanung zurück zu führen. Manche Anlagen wurden abgestellt, wenn die Kampagne nicht groß genug war. Um das Risiko zu minimieren wurde durch die Erhöhung des C_{Norm} -Funktionswertes ein größerer Puffer

⁴⁰³ Vgl. Lusti, M. (1999), S. 252

geschaffen. Das zeigt, dass die Kritik von Inderfuth et al. (siehe Abschnitt 4.6) berechtigt ist. Die Bestimmung des Streckfaktors und des C_{Norm} -Funktionswert für alle Anlagen erforderte viele Arbeitsstunden.

Im nächsten Schritt wurden die adaptierten Produktionskennlinien für alle im Projektumfang enthaltenen Anlagen erstellt. Da für jedes Aggregat die Parameter eigens bestimmt wurden, gab es zwischen der vierten und dritten Phase eine Schleife.

Nachdem das Modell erfolgreich eingesetzt wurde, soll es im gesamten Unternehmen implementiert werden. Die Disponenten sollen es in ihre tägliche Arbeit integrieren. Dies wird durch die Einpflegung in das PPS-System erreicht. Dieser Schritt ist nicht Teil dieses Modells und wird in der vorliegenden Arbeit nicht ausgearbeitet.

6.4 Beispielhafte Darstellung von aggregatspezifischen Erkenntnissen

Exemplarisch werden die Ergebnisse der Berechnung des Modells von drei Anlagen dargestellt:

- Längsteilschere
- Horizontalvergüteofen
- Streckrichtanlage

Die Aggregate wurden als Beispiele ausgewählt, da sie unterschiedliche Ergebnisse aufweisen.

Die Längsteilschere gehört zu den Finalanlagen und bildet in manchen Monaten einen Engpass. An dieser Anlage werden die Bänder auf die vom Kunden gewünschte Breite zugeschnitten. Im Horizontalvergüteofen werden Bleche mit speziellen Legierungen auf hohe Temperaturen erhitzt und danach schnell abgeschreckt. So werden ausgehärtete Zustände erreicht. Die Streckrichtanlage ordnet sich im Produktionsprozess vor den Finalanlagen ein, muss jedoch nur von wenigen Produkten durchlaufen werden. Diese Anlage verbessert die Planheit, reckt dünne Bänder und entfettet oberflächenkritische Produkte. Ebenso können Bänder an dieser Anlage besäumt werden. Abbildung 46 zeigt das Layout der AMAG Rolling, in welchem die drei ausgewählten Aggregate blau eingefärbt sind.

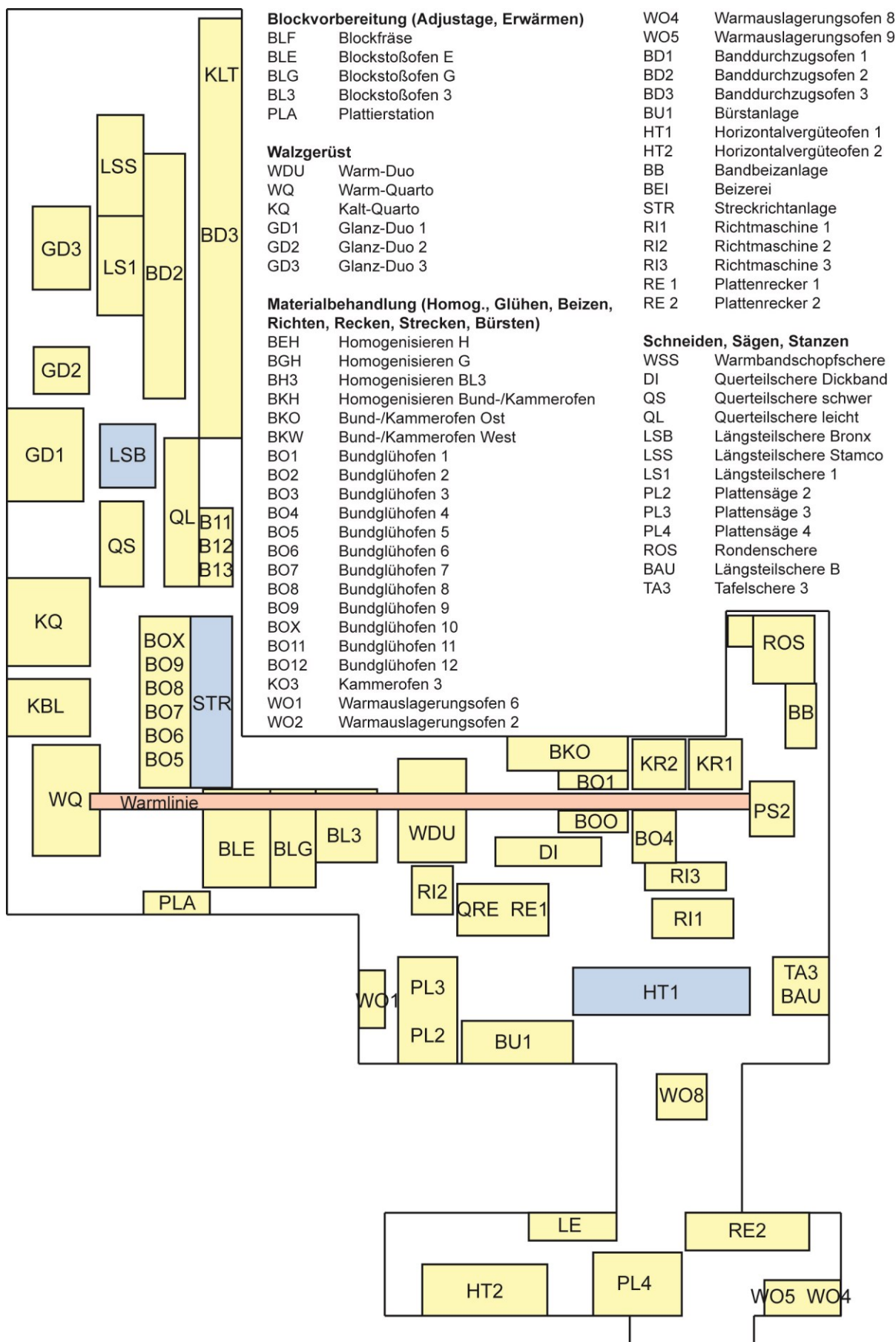


Abbildung 46: Layout AMAG

6.4.1 Längsteilschere Bronx

Abbildung 47 zeigt die Produktionskennlinie mit der Gesamtanlageneffektivität einer Längsteilschere. Diese weist eine Verfügbarkeit von rund 60 % auf; ein niedriger Wert. Der Leistungsgrad liegt bei knapp 90 % und die Qualitätsrate bei 100 %. Bei letzterem besteht daher kein Handlungsbedarf. Die Leistungslinie zeigt einen aktuellen Betriebspunkt bei 135 h und einen idealen Bestand bei 46h. Das bedeutet, dass der Bestand um 89 h (66 %) (siehe Tabelle 11) reduziert werden könnte. Bei 46 h würde genug Bestand vor der Anlage liegen um diese auslasten zu können.

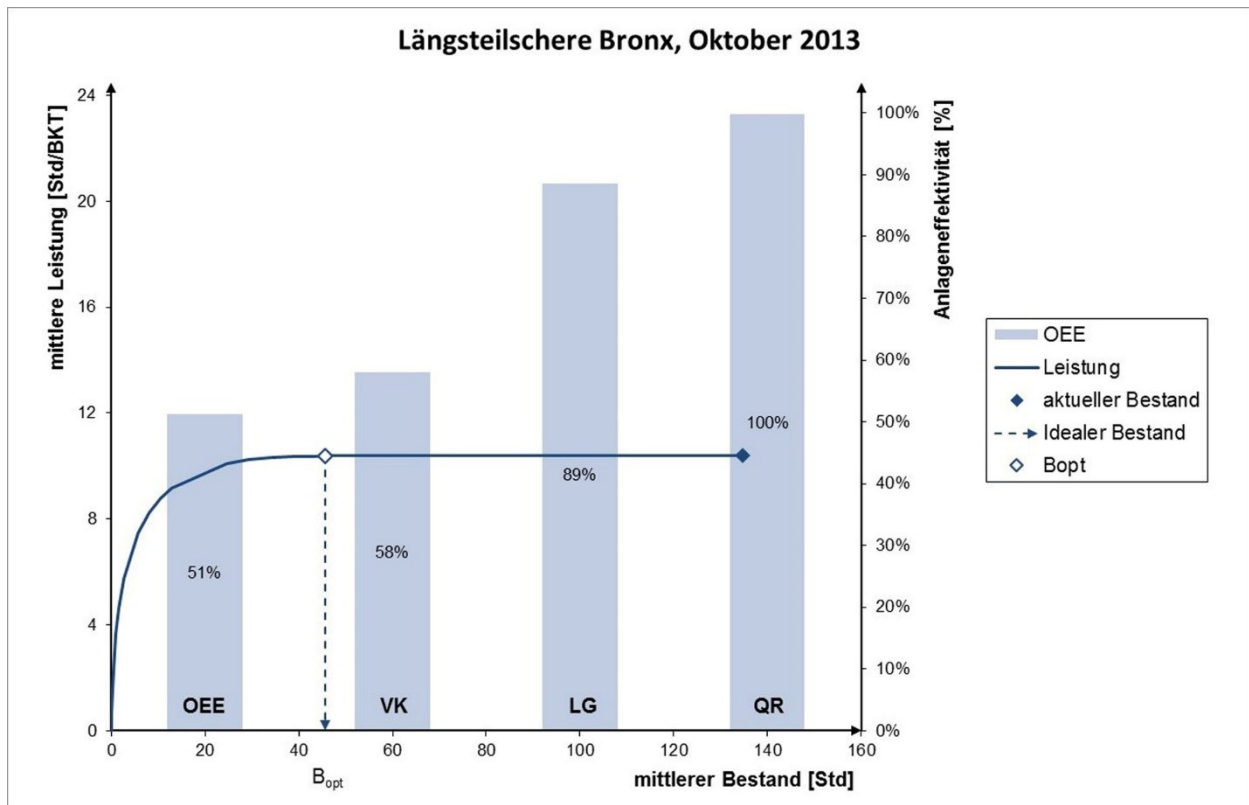


Abbildung 47: Auswertung Analysemodell Längsteilschere Bronx, Oktober 2013

Die Auswirkungen einer Verbesserung der OEE können in Abbildung 48 abgelesen werden. Es wurde eine Steigerung der Verfügbarkeit auf 85 % und eine Erhöhung des Leistungsgrades auf 95 % angenommen. Diese Werte sind frei wählbar bzw. aufgrund von Abschätzungen und Prognosen festzulegen.

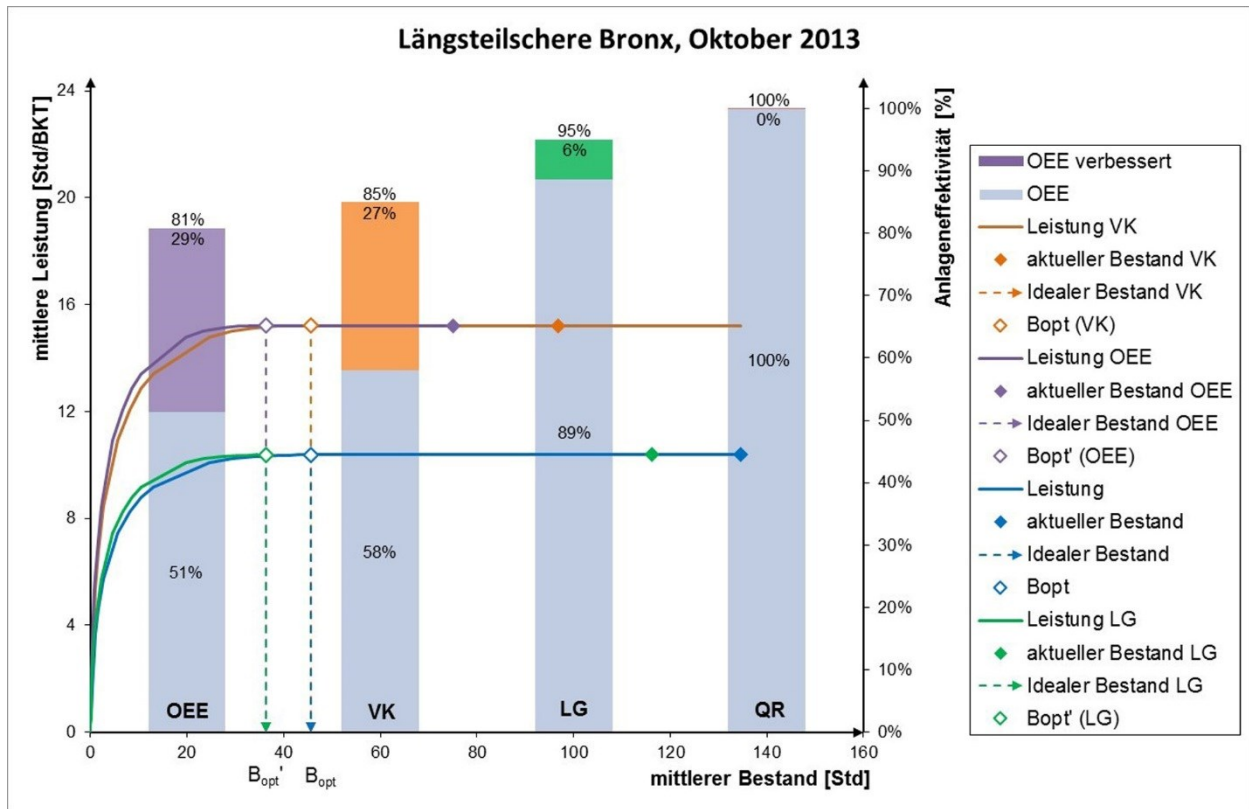


Abbildung 48: Auswertung Wirkmodell Längsteilschere Bronx, Oktober 2013

In Abbildung 48 sind die Verbesserungen grafisch und in Tabelle 10 prozentuell abgebildet. Die Leistungslinie kann um einiges erhöht werden. Ebenso weist die optimierte Linie eine flachere Krümmung auf und ergibt einen um 73 % (siehe Tabelle 11) reduzierten idealen Bestand. Es ist also erkennbar, dass der Bestand um viele Stunden reduziert werden kann.

Die Ergebnisse und Werte der vier ausgegebenen Fälle sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Ergebnisse Längsteilschere Bronx, Oktober 2013

	aktuell	VK	LG	QR	Komplett
Ø aktueller Bestand [h]	135	97	116	135	75
mittlere Leistung [h]	10	15	10	10	15
idealer Bestand [h]	46	46	36	46	36
OEE [%]	51	75	55	51	81
VK [%]	58	85	58	58	85
LG [%]	89	89	95	89	95
QR [%]	100	100	100	100	100

Kann allein die Verfügbarkeit erhöht werden, würde sich der durchschnittliche aktuelle Bestand von 135h auf 97 h reduzieren, ohne dass sich der Zustrom ändert. Ein aktives Reduzieren des Bestandes aufgrund des besser getakteten Zugangs wäre bis zu einer Bestandshöhe von 46 h

möglich. Bei der Verbesserung des Leistungsgrades könnte der Bestand auf 36 h reduziert werden. Wobei diese Reduktion vorwiegend durch die Verringerung der Bearbeitungszeit pro Auftrag und nicht die Verringerung der Anzahl derselben möglich ist.

Aus Tabelle 10 sind die möglichen Verbesserungen zu entnehmen. In diesem Fall muss die Qualitätsrate nicht mehr verbessert werden, da sie fast 100 % beträgt. Die mittlere Leistung kann durch die Steigerung der Verfügbarkeit auf 85 % um 47 % erhöht werden. Der ideale Bestand kann aufgrund einer Steigerung des Leistungsgrades um 20 % gesenkt werden.

Tabelle 10: Mögliche Verbesserung Längsteilschere Bronx, Oktober 2013

	VK	LG	QR	Komplett
Reduktion Ø aktueller Bestand [%]	28	14	0	44
Steigerung mittlere Leistung [%]	47	0	0	47
Reduktion idealer Bestand [%]	0	20	0	20
Steigerung OEE [%]	24	4	0	29
Steigerung VK [%]	27	0	0	27
Steigerung LG [%]	0	6	0	6
Steigerung QR [%]	0	0	0	0

In Tabelle 11 ist die Reduktion des Bestandes abgebildet. In der ersten Zeile wird jeweils der aktuelle Bestand mit dem idealen Bestand in der jeweiligen Kategorie verglichen. Das bedeutet, der zweiten Wert in der ersten Zeile gibt die Differenz zwischen aktuellen und idealen Bestand (ausgedrückt in %) der Leistungslinie, die durch eine verbesserte Verfügbarkeit entsteht, an. In der zweiten Zeile ist die Reduktion von den jeweiligen aktuellen Beständen auf den idealen Bestand der ursprünglichen Leistungskennlinie angegeben. Für den Wert in der zweiten Zelle der zweiten Zeile bedeutet dies: $\text{Aktueller Bestand}_{\text{aktuell}} - \text{idealer Bestand}_{\text{Verfügbarkeit}}$.

Tabelle 11: Reduktion des Bestandes Längsteilschere Bronx, Oktober 2013

	aktuell	VK	LG	QR	Komplett
Ø aktueller Bestand - idealer Bestand (jede Kategorie für sich) [%]	66	53	69	66	52
Ø aktueller Bestand - idealer Bestand von „aktuell“ [%]	66	66	73	66	73

6.4.2 Horizontalvergüteofen 1

Der Ofen ist besser ausgelastet als die Längsteilschere. Zu Beginn des Projektes waren diese Öfen teilweise ein Engpass. Mittlerweile wurde die Kapazität durch einen zusätzlichen Ofen aufgestockt.

Seine mittlere Leistung liegt bei 19h. Die Verfügbarkeit ist mit knapp 90% ebenfalls besser (siehe Abbildung 50). Allerdings ist der Leistungsgrad schlechter. Er liegt bei 75 %. Die Qualitätsrate (100 %) ist in Folge der technologischen Aufgabe wenig relevant.

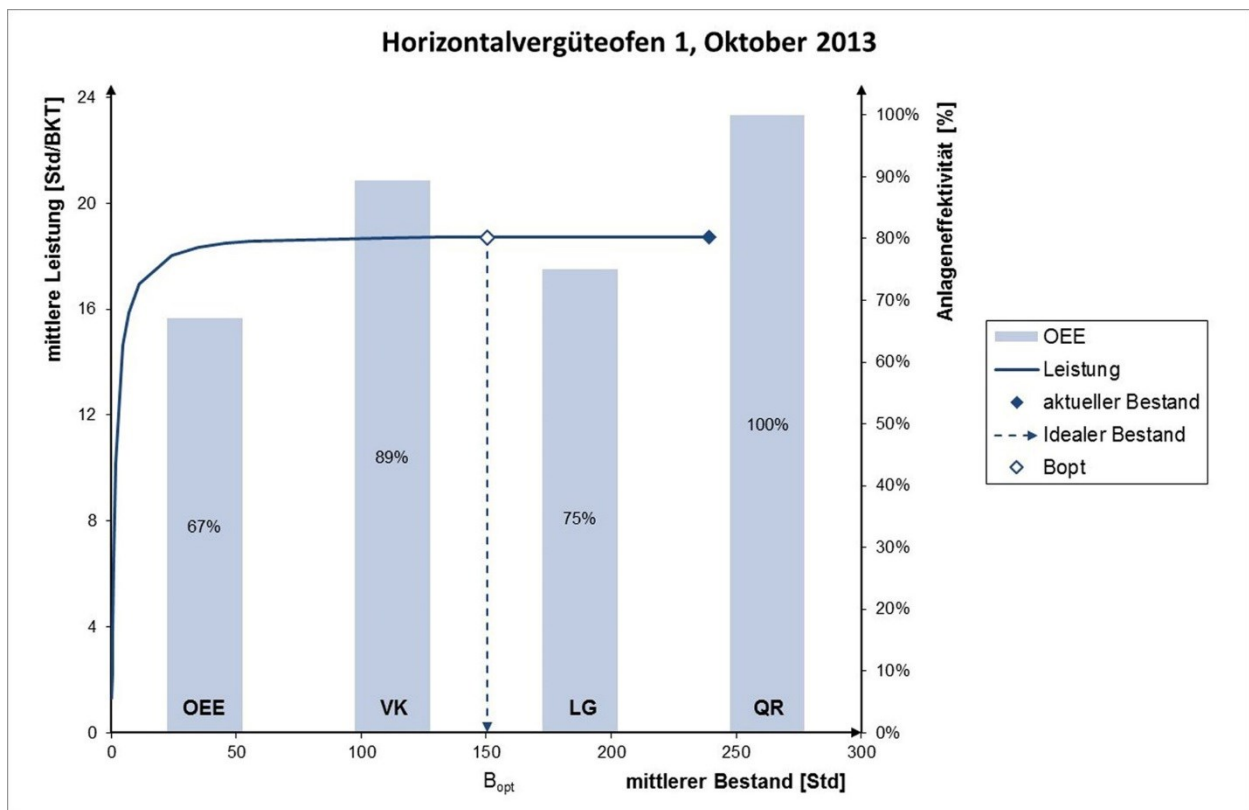


Abbildung 49: Auswertung Analysemodell Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013

Dieses Aggregat ist ein gutes Beispiel dafür, dass eventuell eine geringere Auslastung, welche einen weit geringeren idealen Bestand zulassen würde, sinnvoll ist. Dieser Fall wird in der Produktionskennlinie sichtbar. Würde man eine Auslastung von 99 % in Kauf nehmen, was eine minimale Auslastungseinbuße bedeutet, könnte dieser Zustand mit 53 h erreicht werden (siehe Abbildung 50). Dies zeigt wie sensibel die Kennlinien sind und wie wichtig es ist, die Parameter oder gewünschten Zustände im Vorhinein zu diskutieren und festzulegen.

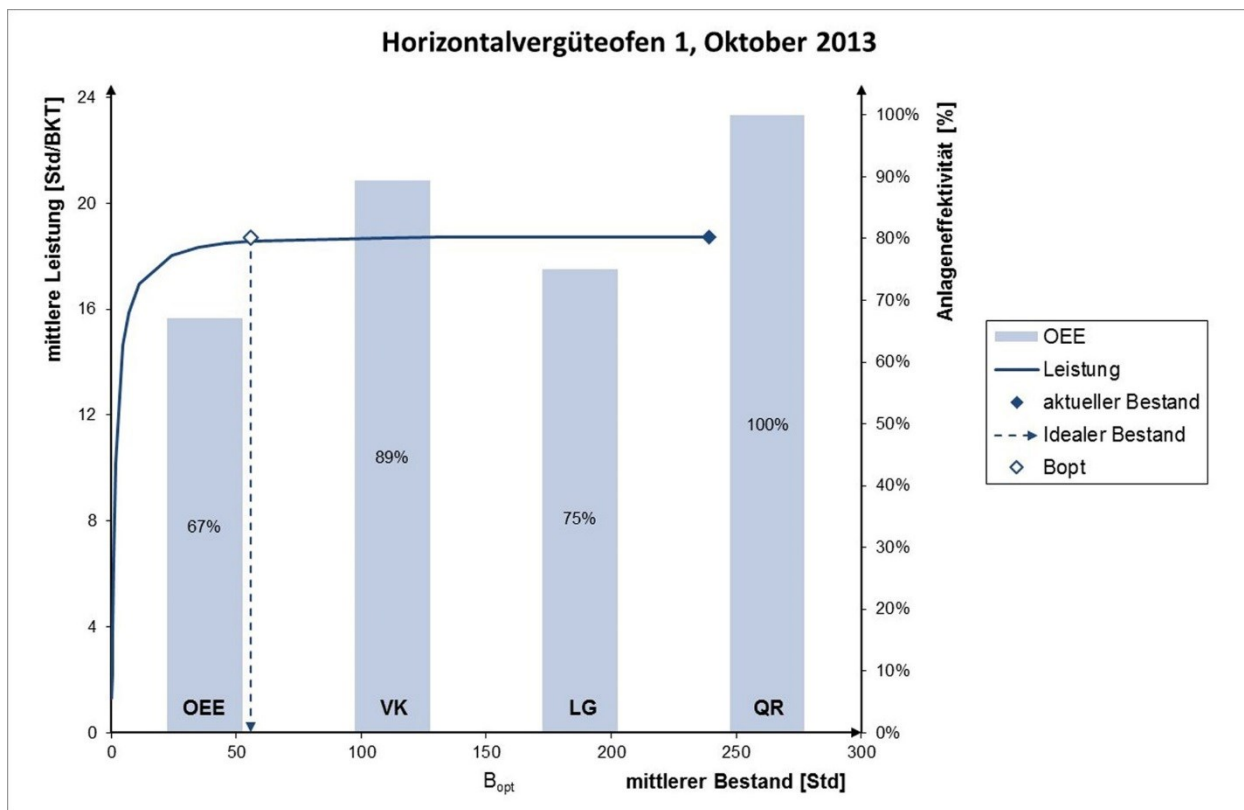


Abbildung 50: Auswertung Analysemodell Horizontalvergueteofen 1, Oktober 2013, 99% Auslastung

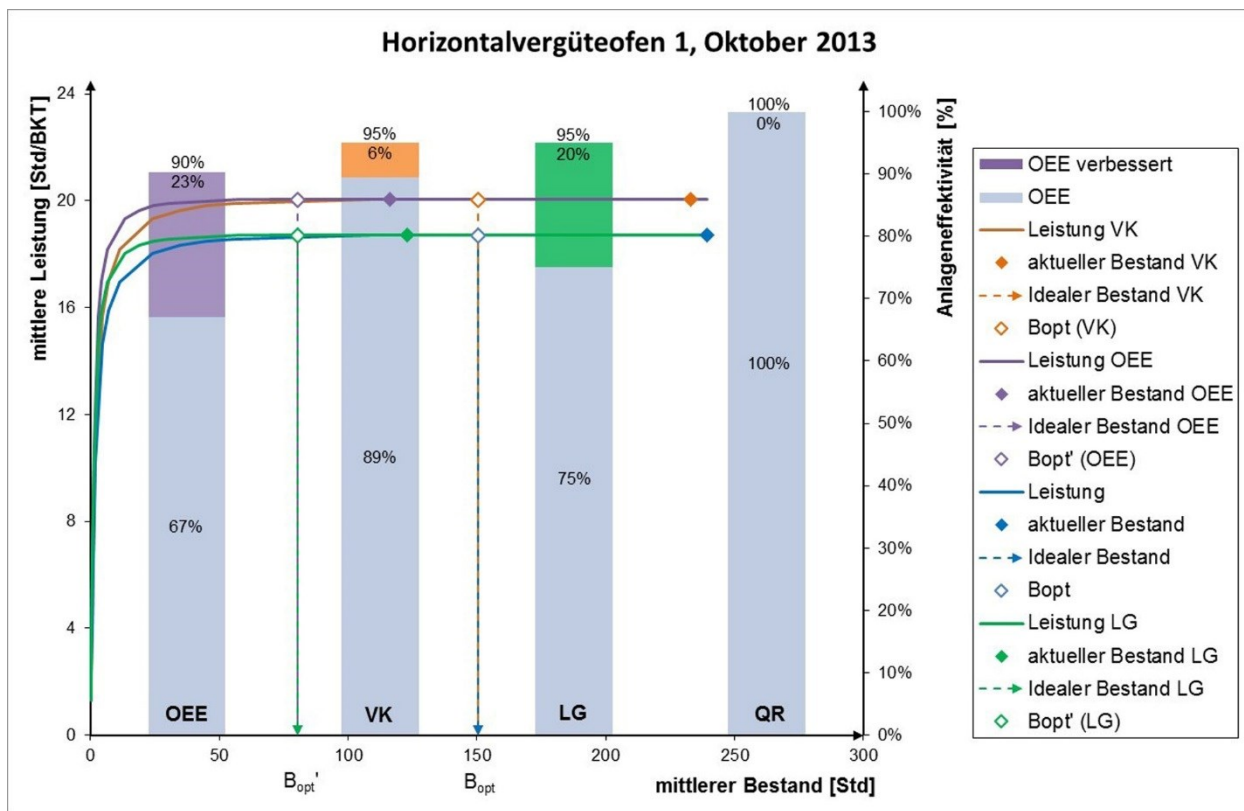


Abbildung 51: Auswertung Wirkmodell Horizontalvergueteofen 1, Oktober 2013

Abbildung 51 geht wieder von einer 100 %igen Auslastung aus. Da die Verfügbarkeit bereits bei rund 90 % liegt wird eine Steigerung um 5 % angenommen. Beim Leistungsgrad ist das Ziel höher gesteckt. Es sollen 95 % erreicht werden. Aufgrund dieser Steigerung ist der unterschiedliche Verlauf der Kennlinien vor allem in der Krümmung deutlich zu sehen.

Zur Übersicht sind in Tabelle 12 wieder die Ergebnisse in Zahlen ausgedrückt. Im besten Fall dieser Annahme (95 % Verfügbarkeit und Leistungsgrad und 100 % Qualitätsrate) ist ein Bestand von 81 h ausreichend um eine Vollauslastung gewährleisten zu können. Dabei steigt die mittlere Leistung auf 20 h pro Betriebskalendertag an.

Tabelle 12: Ergebnisse Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013

	aktuell	VK	LG	QR	Komplett
Ø aktueller Bestand [h]	239	233	123	239	116
mittlere Leistung [h]	19	20	19	19	20
idealer Bestand [h]	150	150	81	150	81
OEE [%]	67	71	85	67	90
VK [%]	89	95	89	89	95
LG [%]	75	75	95	75	95
QR [%]	100	100	100	100	100

Die Steigerung der Effektivität würde eine Reduktion des mittleren aktuellen Bestandes um 51 % bewirken. Dies zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Mögliche Verbesserung Horizontalvergüteofen 1, Oktober 2013

	VK	LG	QR	Komplett
Reduktion Ø aktueller Bestand [%]	3	49	0	51
Steigerung mittlere Leistung [%]	7	0	0	7
Reduktion idealer Bestand [%]	0	46	0	46
Steigerung OEE [%]	4	18	0	23
Steigerung VK [%]	6	0	0	6
Steigerung LG [%]	0	20	0	20
Steigerung QR [%]	0	0	0	0

Tabelle 14 ist zu entnehmen, dass eine Leistungsgradsteigerung die Senkung des Bestandes um 66 % ermöglichen würde, was größtenteils durch die Verringerung der Bearbeitungszeiten erreicht werden könnte. Für eine effektivere Nutzung der Anlage sollte auch die Verfügbarkeit gesteigert werden.

Tabelle 14: Reduktion des Bestandes Horizontalvergüteeofen 1, Oktober 2013

	aktuell	VK	LG	QR	Komplett
Ø aktueller Bestand - idealer Bestand (jede Kategorie für sich) [%]	37	35	34	37	31
Ø aktueller Bestand - idealer Bestand von „aktuell“ [%]	37	37	66	37	66

6.4.3 Streckrichtanlage

Diese Anlage wurde als Beispiel ausgewählt, da ihre Produktionskennlinie Besonderheiten aufweist. Abbildung 52 zeigt einen niedrigen OEE-Wert mit rund 40 %. Dieser ergibt sich aus einer sehr niedrigen Verfügbarkeit von 53 % und einem niedrigen Leistungsgrad von 72 %. Lediglich die Qualitätsrate ist mit knapp 100 % sehr hoch. Die mittlere Leistung ist mit 12 h sehr niedrig. Positiv ist die geringe Spanne zwischen aktuellem und idealem Bestand, die 15 h beträgt. Anzumerken ist, dass nur wenige spezielle Produkte von dieser Anlage bearbeitet werden. Sie ist deshalb nicht ausgelastet und wird aus diesem Grund nur in einer Schicht betrieben und teilweise planmäßig abgestellt. Wenn dieses Aggregat nicht betrieben wird, werden die Mitarbeiter an anderen Stellen eingesetzt.

Obwohl an dieser Anlage kein dringender Handlungsbedarf besteht, wird sie als Beispiel herangezogen, da die Kennlinie dieser Anlage zeigt, wie sich nicht genutzte Überkapazität darstellt.

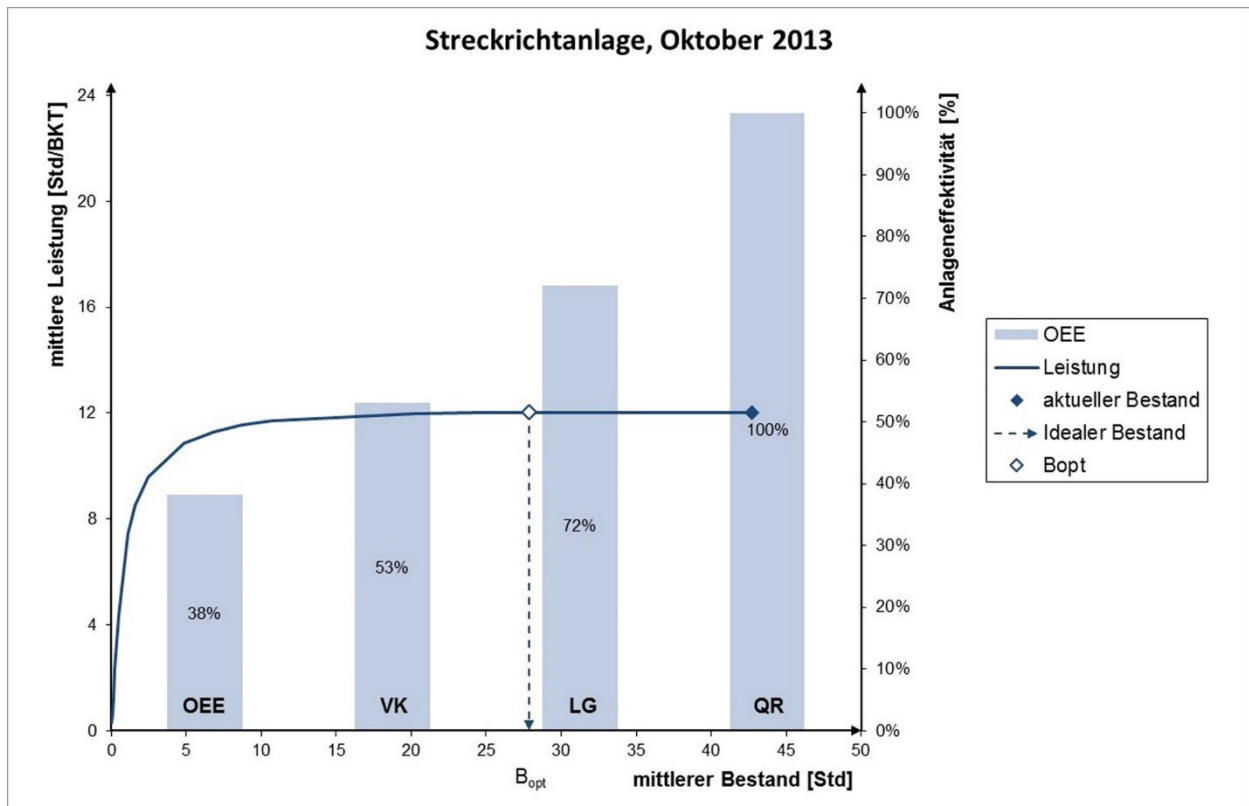


Abbildung 52: Auswertung Analysemodell Streckrichtanlage, Oktober 2013

Würde in diesem Fall die Verfügbarkeit auf 85 % und der Leistungsgrad auf 95 % und somit die OEE auf rund 80 % erhöht werden, würde dies folgende Veränderungen ergeben (siehe Abbildung 53).

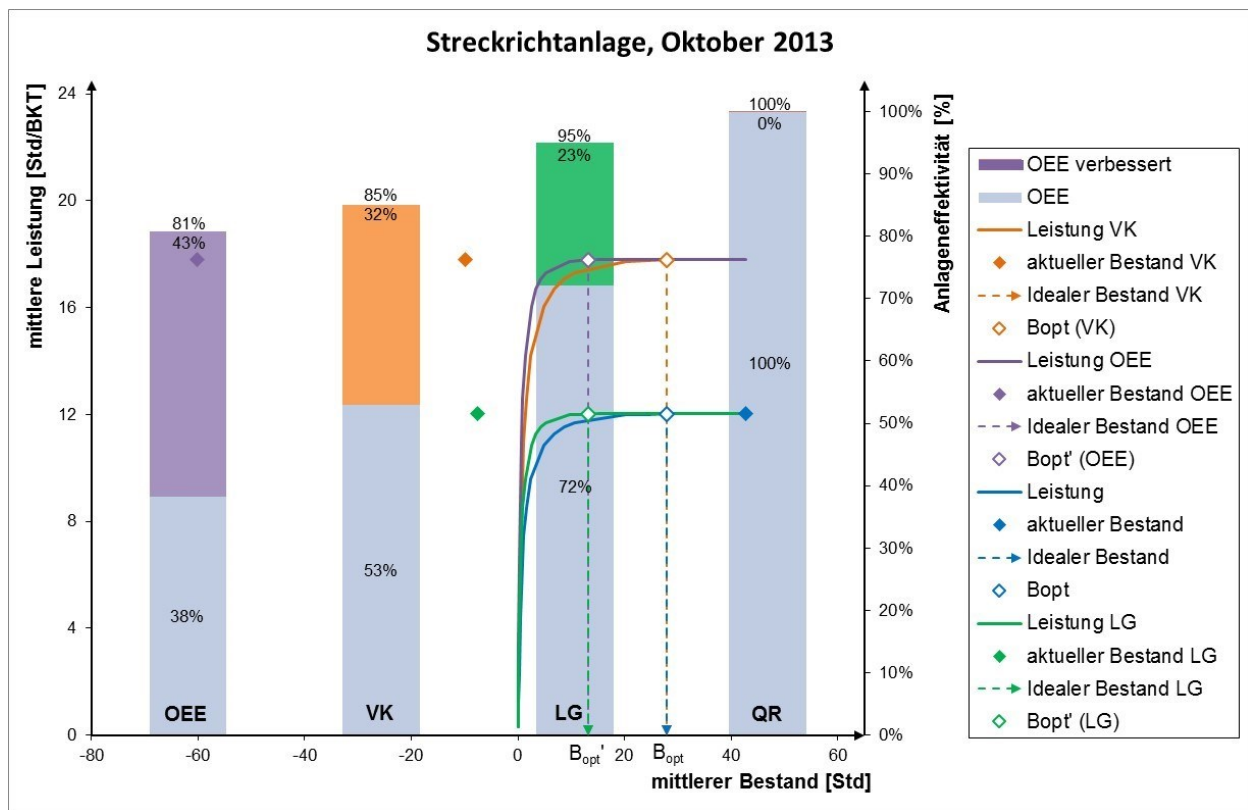


Abbildung 53: Auswertung Wirkmodell Streckrichtanlage, Oktober 2013

Die durchschnittlichen aktuellen Bestände von den drei modifizierten Zuständen wären negativ. Dies kann sich ergeben, da der Zugang nicht verändert wird. Es wird von einem gleichbleibenden Produktionsprogramm ausgegangen. In diesem Fall müsste dies angepasst werden. Abbildung 53 zeigt, dass diese Anlage mehr produzieren und abarbeiten könnte, als sie das zurzeit tut. Voraussetzung dafür ist, dass die Auftragslage dies erfordert.

6.4.4 Weitere Analysen am Beispiel Längsteilschere Bronx

Um eine Verbesserung der Effektivität und der Bestandssituation der Längsteilschere Bronx zu erreichen, werden weitere Analysen anhand der entwickelten Analysepyramide durchgeführt.

Die Auswertung des Erklärungs- und Beschreibungsmodells hat ergeben, dass vor allem der Bestand zu hoch ist und die Verfügbarkeit verbessert werden sollte. Ebenso würde eine Erhöhung des Leistungsgrades die Anlageneffektivität steigern. Wie dies durchgeführt werden kann und wo anzusetzen ist, könnten weitere Analysen ergeben.

Bestandsseite

Die Abweichungsanalyse bei der Längsteilschere Bronx ergibt eine Differenz von Ist- zu Sollbestand von 89 h. Dies bedeutet, dass der Bestand vor einer Optimierung der Effektivität, um 89 h reduziert werden kann bzw. soll. Es liegt zu viel Bestand vor der Anlage. Um dies zu erreichen, müssen das Produktionsprogramm und die Fertigungssteuerung oder Auftragsfreigabe neu angepasst werden.

In diesem Fallbeispiel soll dies durch die Integration des Wirkmodells in das PPS-System erreicht werden. Es ist geplant, den Disponenten die Abweichung des eingeplanten Bestandes zum idealen Bestand durch einen Farbcode anzeigen zu lassen.

Anlagenseite

Die Verfügbarkeit der Längsteilschere Bronx beträgt im Oktober 2013 knapp 58%. Dies kann aus dem entwickelten Modell abgelesen werden. Da dieser Wert niedrig ist, gibt er Anlass zu einer detaillierteren Analyse mit Hilfe des Effektivitätsportfolios. Für die Erstellung des Verfügbarkeitsportfolios werden jeweils die Stunden, in denen die Anlage ausgefallen ist und jene, die für das Rüsten und Einrichten benötigt wurden, aufsummiert. In Tabelle 15 sind diese Werte aufgelistet. Die Fläche der Blase gibt die Gesamtstundenzahl der Störungen wieder.

Tabelle 15: Werte Verfügbarkeitsportfolio

Rüsten/Einrichten	93,31 %
Anlagenausfall	6,69 %
Gesamtstunden	412,61 h

Das dazugehörige Portfolio zeigt Abbildung 54.

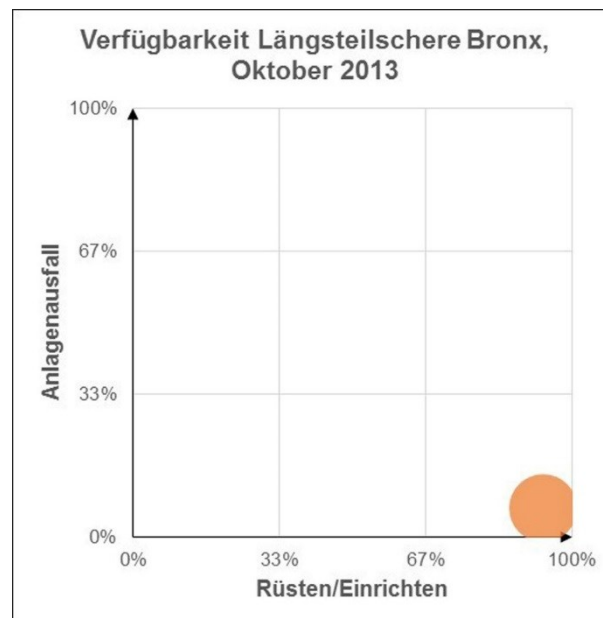


Abbildung 54: Verfügbarkeitsportfolio Längsteilschere Bronx

Aus diesem Portfolio ist zu erkennen, dass das Rüsten und das Einrichten den größten Anteil der Störungen aus Sicht der Verfügbarkeit verursachen. Dies bedeutet, wie in Abbildung 35 in Abschnitt 5.2.1 gezeigt wird, dass eine Verbesserung der Verfügbarkeit hauptsächlich durch eine neue Rüststrategie erzielt werden kann.

In diesem Fall benötigen der Zusammenbau und das Wechseln des Messerblocks viel Zeit und zwingen die Anlage zum Stillstand. Im Sinne von SMED könnte der Messerblock, während die Anlage den vorigen Auftrag fertigt, zusammengebaut werden. Wenn es möglich war, wurde dies durchgeführt. Allerdings fehlte oft das Personal um schneller zu sein, als der vorhergehende Auftrag zur Bearbeitung benötigt. Dies muss bei der Personal- und der Ablaufplanung berücksichtigt werden.

Abbildung 55 zeigt die drei Beispielanlagen im Verfügbarkeitsportfolio. Aufgrund der vergleichenden Darstellung der Verfügbarkeiten der drei Aggregate ist erkennbar, dass die Längsteilschere

Bronx die höchste Anzahl an Stunden Störstunden aufweist und der Horizontalvergüteofen 1 am wenigsten. Die Auswertung der Streckrichtanlage zeigt den Schwerpunkt bei den Anlagenausfällen. In diesem Fall muss die Instandhaltungsstrategie überdacht und verbessert werden.

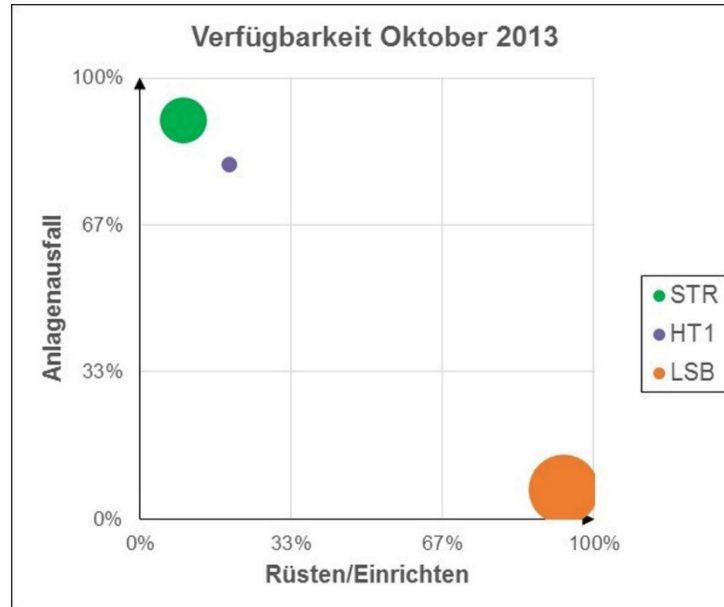


Abbildung 55: Anlagenvergleich im Verfügbarkeitsportfolio

6.5 Schlussfolgerungen

Wie zu Beginn der Arbeit angegeben wurde, soll das entwickelte Modell zur Analyse und Planung optimaler Bestände dienen. Die Erfüllung dieses Ziels zeigt dieses Kapitel. Dieses Modell gibt den Disponenten die Hilfestellung, wie weit der Bestand vor den Anlagen reduziert werden kann, um eine Vollausslastung der Anlagen unter derzeitigen Gegebenheiten zu erreichen. Zusätzlich zeigt es an, wo die Anlageneffektivität Verbesserungspotenzial aufweist.

Herausforderungen

Im Laufe des Projektes und der Entwicklung des Modells gab es einige Herausforderungen, die es zu bewältigen galt:

- *Datengenauigkeit:* Im Zuge des Projektes wurden einige Ungenauigkeiten bezüglich der Daten aufgedeckt. Es stimmten teilweise die Zeiten aus unterschiedlichen Systemen nicht überein. Des Weiteren wurden Daten per Hand von Mitarbeitern eingetragen. Diese waren teilweise zu ungenau oder wurden pro Tag zusammengefasst und nicht wie gewünscht pro Auftrag eingegeben.
- *Einrichten der Produktionskennlinien:* Herausfordernd war die Anpassung der Produktionskennlinie an die realen Gegebenheiten. Die Bestimmung der Parameter α_1 und C erforderte einen großen Zeit- und Arbeitsaufwand.
- *Berechnung des Leistungsfaktors:* Dieser Faktor ist am schwierigsten zu berechnen. Zu anfangs war nicht klar, wie die Soll-Leistung zu definieren ist, da verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefertigt werden.

Diese Problematiken sowie der Zeitaufwand, der dadurch entsteht, relativieren sich aufgrund mehrmaliger Anwendung. Ist die Datengenauigkeit festgelegt und die Erhebung in ausreichender Qualität ermöglicht, können die Daten automatisiert abgerufen und ausgewertet werden. Dasselbe gilt für den Punkt der Anpassung der Kennlinien. Ist dies geschehen, muss gelegentlich überprüft werden, ob die Rahmenbedingungen unverändert sind. Die Berechnung des Leistungsfaktors muss zu Beginn festgelegt werden.

Ergebnisse AMAG

Der Aufwand der Anpassung und Einführung dieses Modells wurde durch die Ergebnisse, welche damit erzielt wurden, gerechtfertigt:

- *Umwandlung von implizitem in explizites Wissen.* Aufgrund der Angabe des idealen Bestandes samt Toleranzen, ist es den Disponenten möglich ein bestimmtes, ausgewiesenes Bestandsniveau anzustreben und einzuhalten. Diese Höhe entspricht nicht ihrer Erfahrung, sondern wird berechnet und vom Modell angegeben.
- *Planungsvorgaben für WF neu definiert.* Das Produkt WF, welches für einen großen Kunden wöchentlich produziert wird, verursachte die „Wellen“, die durch die Fertigung geschoben wurden. Die Bearbeitung am Beginn der Fertigung wurde gesplittet, wodurch sich der Bestand an der Längsteilschere 1 nicht mehr schlagartig erhöht.
- *Reduktion von Bestand.* Durch die Anzeige des idealen Bestandes kann der Bestand vor den Anlagen gesenkt werden. Im Projekt wurden 18 Aggregate analysiert. Im Februar 2015 wiesen sieben von jenen einen Bestand im idealen Bereich auf. Bei acht Aggregaten lag der Bestand über dem Level und bei drei darunter.
- *Datengenauigkeit:* Diese Probleme wurden durch die Abstimmung der Daten und Prüfung auf Plausibilität gelöst. Nach dem Projekt wurde damit begonnen das MES (Manufacturing Execution System) umzustellen und eine andere Software zu implementieren. Dadurch wird das Programm anwenderfreundlicher und die Daten können genauer erhoben werden.

Nach dem Projekt arbeitet die AMAG daran, Maßnahmen umzusetzen um damit die Verbesserungen zu erzielen. Die Ergebnisse, die daraus entstehen werden, können zu diesem Zeitpunkt nur allgemein abgeschätzt und angegeben werden.

Allgemeine Ergebnisse

Mit der Anwendung des Wirkmodells könnten allgemein, zusätzlich zu den oben genannten Punkten, folgende Ergebnisse erzielt werden:

- *Verbesserungspotenziale auf einen Blick.* Die Zusammenführung von OEE und Produktionskennlinie ermöglicht eine rasche Analyse auf einen Blick, welche Schwachstellen aufzeigt.
- *Auswirkungen der Verbesserungen sichtbar.* Aufgrund der drei hinzugefügten Leistungskennlinien im Modell kann der zukünftige ideale Bestandsbereich ausgewiesen werden.

- *Erhöhung der Produktivität.* Die Optimierung der Gesamtanlageneffektivität bewirkt eine bessere Produktivität der Anlage, gemessen an Aufträgen pro Tag. Durch die Steigerung von Verfügbarkeit und Leistungsgrad können mehr Aufträge an einem Tag gefertigt werden.
- *Erfahrungswert wird zur Kenngröße.* Durch das Modell gibt es eine Kenngröße die den Bestandwert angibt. Somit ist es unerfahrenen Mitarbeitern möglich Bestandsgrenzen zu setzen.
- *Senkung des gebundenen Kapitals und der Durchlaufzeit.* Werden die Bestände vor den Aggregaten auf das, durch das Modell angegebene Niveau reduziert, verringert sich die Durchlaufzeit. Sind die Bestände im Prozess geringer, müssen Aufträge weniger lange warten und können den Prozess schneller durchlaufen. Dadurch, dass weniger Bestand auf die Bearbeitung wartet und sich dadurch der gesamte Bestand im Prozess verringert, ist weniger Kapital in diesem gebunden.

Mit diesem Abschnitt ist nun auch die letzte Teilfrage beantwortet.

7 Abschließende Betrachtung und Resümee

„Wo damals die Grenzen der Wissenschaft waren, da ist jetzt die Mitte.“

Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799), deutscher Physiker

Dieses Kapitel dient einer abschließenden Betrachtung der Ergebnisse samt weiterführenden Überlegungen. Dafür wird im ersten Abschnitt eine Zusammenfassung der Ziele, Ergebnisse und Erkenntnisse gegeben. Der zweite Teil befasst sich mit Empfehlungen zu zukünftigen Forschungsfeldern, die sich aus dieser Arbeit heraus ableiten lassen.

7.1 Zusammenfassung

Der dynamische Markt und eine strategische Ausrichtung als Nischenproduzent in der Prozessindustrie fordern eine hohe Variantenvielfalt und Flexibilität gepaart mit hoher Lieferfähigkeit und Lieferflexibilität. Kurze Lieferzeiten und hohe Termintreue stellen kritische Erfolgsfaktoren dar. Diese Anforderungen führen zu einer Produktion in kleinen Losen, machen eine hohe Produktdifferenzierung erforderlich und treiben die Bestände in den Prozessen in die Höhe. Hohe Bestände sind hohes gebundenes Kapital und verursachen lange Durchlaufzeiten. Eine Reduktion der Bestände birgt die Gefahr in sich, einerseits an Flexibilität zu verlieren und andererseits die Anlagen nicht auslasten zu können. In der anlagenintensiven Industrie, wie der Prozessindustrie, ist eine hohe, ökonomische Anlagenauslastung essentiell.⁴⁰⁴

Aufgrund dieser Sachverhalte lässt sich folgende Forschungsfrage ableiten:

Wie ist ein Wirkmodell zur Analyse und Verbesserung der Kapitalproduktivität im Anlagen-Bestand-Verbund für die Prozessindustrie aufgebaut und welche Analysen, Methoden oder Modelle sind in weiterer Folge anzuwenden um Optimierungsmaßnahmen erarbeiten zu können?

Es sollte ein Wirkmodell entwickelt werden, welches einerseits die Disponenten unterstützt das richtige Bestandsniveau festlegen zu können und andererseits eine Hilfe für den Ansatzpunkt zur Erreichung einer effektiveren Anlagenauslastung gibt. Dabei gilt es auf die Komplexität der Ausgangssituation und des entwickelten Modells einzugehen.

Die Aufarbeitung der Problematik begann mit dem Ausarbeiten der wissenschaftlichen Grundlagen. Dabei wurden der entscheidungsorientierte Ansatz der Betriebswirtschaftslehre, die Modelltheorie, die Systemtheorie und die Komplexitätstheorie als Basis für das zu entwickelnde Modell herangezogen. Die Besonderheiten in der Prozessindustrie gestalten ebenso die Ausgangssituation mit, da das Wirkmodell dort eingesetzt werden soll. Vor allem divergente Produktionsstrukturen, große Arbeitslose und hochvolumige Linienproduktion wurden als Besonderheiten genannt. Die Prozessindustrie weist sowohl Charakteristika der Fließ- als auch der

⁴⁰⁴ Vgl. Samac, K. (2014b), S. 22

Chargenfertigung auf. Bei der Planung und Steuerung muss auf das Anlagenlayout Rücksicht genommen werden. Diese Punkte machen die Produktion in der Prozessindustrie komplex. Hinzu kommt, dass die, in den meisten Fällen eigens für die Prozesse entwickelten Anlagen, sehr speziell und wenig flexibel einsetzbar sind. Dies verleiht der Anlagenauslastung einen hohen Stellenwert. Für die Verbesserung in der Produktion und Instandhaltung auf operativer Ebene gibt es zahlreiche Methoden. Lean Management, Kaizen, kontinuierlicher Verbesserungsprozess und Theory of Constraints könnten Verbesserungen bewirken, sind jedoch nicht geeignet um die Problemstellung dieser Arbeit zu lösen. Die Gesamtanlageneffektivität aus dem Themengebiet Total Productive Maintenance (TPM) kann für die Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen werden. Durch die Faktoren Verfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsrate, in welche sechs Anlagenverluste einwirken, wird die Effektivität einer Anlage wiedergegeben. Daher ist die Gesamtanlageneffektivität eine umfassende Kennzahl, die zur Lösung der Aufgabenstellung dieser Arbeit beiträgt.

Zur vollständigen Lösung des ersten Teils der Forschungsfrage, wurde das Modell der Produktionskennlinie nach NYHUIS und WIENDAHL identifiziert. Es ist eine Weiterentwicklung des Trichtermodells und des Durchlaufdiagramms und unterstützt die Positionierung im logistischen Spannungsfeld. Die aktuelle mittlere Leistung, der aktuelle mittlere Bestand und der ideale Bestand werden mittels aktueller Produktionsdaten berechnet und im Modell dargestellt. Die Produktionskennlinie mit der C_{Norm} -Funktion als zugrunde gelegte Näherungsgleichung setzt sich in der Praxis gegenüber der Simulation und der Warteschlangentheorie durch. Deswegen wurde dieses Modell trotz der Kritik, dass die Wahl des Streckfaktors und des C-Wertes, für die Anpassung der Kennlinie an reale Gegebenheiten, schwierig ist, zur Lösung der Forschungsfrage herangezogen.

Aus den zwei Elementen, der Produktionskennlinie und der Gesamtanlageneffektivität wurde das benötigte Wirkmodell entwickelt. Ersteres analysiert den Bestand und letzteres die Anlage. Im ersten Schritt wurden die Faktoren der Gesamtanlageneffektivität (Verfügbarkeit, Leistungsfaktor und Qualitätsrate) in Form eines Säulendiagramms und das Modell der Produktionskennlinie in einer gemeinsamen Darstellung kombiniert. Dies stellt die Ausgangssituation dar. Im zweiten Schritt wurden drei zusätzliche Leistungskennlinien erstellt, welche jeweils die mittlere Leistung, den mittleren Bestand und den idealen Bestand bei verbesserten Anlageneffektivitätswerten wiedergeben. Die Ergebnisse des entwickelten Modells zeigen einerseits das Potenzial der Reduktion des Bestandes vor der Anlage bei unverändertem Produktionsprogramm und Anlageneffektivität. Andererseits gibt das Modell an, wie sich der aktuelle mittlere Bestand und der ideale Bestand bei einer erhöhten Gesamtanlageneffektivität verändern würden. Diese Informationen helfen den Disponenten bei der Planung und Festlegung des idealen Bestandes vor der Anlage.

Zudem wurde das Wirkmodell in eine Analysepyramide eingebettet, welche den Weg zu einer Verbesserung in den Bereichen „Bestand“ und „Anlage“ angeben und den letzten Teil der Forschungsfrage beantwortet. Sollen die den Bestand betreffenden Analysen vertieft werden, so werden eine Abweichungsanalyse und die Anpassung der Auftragsfreigabe vorgeschlagen. Weitere Analysen in Bezug auf die Anlage können durch die Auswertung der entwickelten

Effektivitätsportfolios gemacht werden, aus denen Normstrategien und in weiterer Folge Maßnahmen abgeleitet werden können.

Zur exemplarischen Darstellung wurde das entwickelte Modell bei der Austria Metall AG angewandt. Im Walzwerk sollten für ausgewählte Anlagen der ideale Bestandsbereich berechnet und festgelegt werden. Von 18 analysierten Aggregaten wiesen sieben einen Bestand im idealen Bereich auf. Bei acht Aggregaten lag der Bestand über dem Level und bei drei darunter. Für die Längsteilschere Bronx, den Horizontalvergütofen 1 und der Streckrichtanlage wurden die Auswertungen angeführt. Das Verfügbarkeitsportfolio der Längsteilschere Bronx ergab, dass die Rüststrategie verbessert und bei den anderen beiden Anlagen die Instandhaltungsstrategie neu geplant werden sollte.

7.2 Ausblick

Während der Auseinandersetzung mit dieser Aufgabenstellung wurde weiterer Forschungsbedarf in einigen Bereichen identifiziert.

Um Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen, sollte das Modell in weiteren Fallbeispielen erprobt werden. Das in dieser Arbeit durchgeführte Fallbeispiel hat gezeigt, dass die Berechnung der empirischen Parameter (α und C) für diesen Fertigungstyp nicht anwendbar ist. In diesem Bereich besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Das entwickelte Modell bezieht sich sehr stark auf nur eine Anlage. Das Produktionsprogramm wird am Rande berücksichtigt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit das neue Modell mit dem Produktionsprogramm zu koppeln, um neue Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Dies könnte mittels Mustererkennung und Data Mining erreicht werden. Zudem ist eine Ausweitung des Modells von Einzelanlagen auf einen Anlagenverbund sinnvoll.

Das Modell befasst sich mit der Kapitalproduktivität im Anlage-Bestand-Verbund. Eine Erweiterung kann die monetäre Bewertung des Umlaufvermögens und des Anlagevermögens bezogen auf eine Anlage sein. Dadurch kann der optimale Bereich aus Sicht der Kosten (Anlage und Bestand) berechnet werden.

Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1998): Produktions-Management. 9., überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 3-409-69117-0.
- Adam, D.; Johannwille, U. (1998): Die Komplexitätsfalle. In: Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement. Wiesbaden: Dr. Th. Gabler Verlag. ISBN 3-409-17938-0, S. 5–28.
- Al-Radhi, M. (2002): Total Productive Management. Erfolgreich produzieren mit TPM. 2. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-21873-4.
- AMAG Austria Metall AG (2015): AMAG-Geschäftsbericht 2014. Neues Werk-Neue Dynamik. Ranshofen, 2015.
- Arnold, D.; Furmans, K. (2007): Materialfluss in Logistiksystemen. 5., erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 3-540-45659-7.
- Ashayeri, J. et al. (1996): A Production and Maintenance Planning Model for the Process Industry. In: International Journal of Production Research, Jg. 34, Nr. 12, S. 3311–3326.
- Ashby, W. R. (1957): An Introduction to Cybernetics, Chapman & Hall LTD, URL: <http://dSPACE.UTALCA.CL/bitstream/1950/6344/2/IntroCyb.pdf> (Zugriff: 13.08.2015).
- Atteslander, P. et al. (2008): Methoden der empirischen Sozialforschung. 12., durchgesehene Auflage, Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH. ISBN 978-3-503-10690-5.
- Balderstone, S. J.; Mabin, V. J. (1998): A Review of Goldratt's Theory of Constraints (TOC) - lessons from the international literature. Proceedings of New Zealand 33rd Annual Conference, Auckland, 1998. Auckland.
- Barnard, A. (2010): Continuous Improvement and Auditing. In: Cox, J. F.; Schleier, J. (Hrsg.): Theory of Constraints. Handbook. New York: MC Graw Hill. ISBN 978-0-07-166554-4, S. 403–454.
- Bauer, J.; Hayessen, E. (2009): 100 Produktionskennzahlen. Wiesbaden: cometis publishing GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-940828-57-6.
- Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-04681-1.
- Baum, D. (2013): Grundlagen der Warteschlangentheorie. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-39631-1.
- Beckmann, H. et al. (2014): Produktionskennlinien im Prozesskettenparadigma. In: Industrie-Management, Jg. 30, Nr. 1, S. 22–26.
- Beck, S. (2013): Modellgestütztes Logistikcontrolling konvergierender Materialflüsse. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH. ISBN 978-3-943104-95-0.
- Beer, S. (1962): Kybernetik und Management. Hamburg: S. Fischer Verlag.
- Belvedere, V.; Grando, A. (2005): Implementing a pull system in batch/mix process industry through Theory of Constraints: A case-study. In: Human Systems Management, Jg. 24, S. 3–12.
- Bibliographisches Institut GmbH (2013): Duden | komplex | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Synonyme, Herkunft. Duden. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/komplex> (Zugriff: 23.03.2015).

- Biedermann, H. (2006): Komplexitätsorientiertes Anlagenmanagement. Köln: TÜV Media GmbH. ISBN 3-8249-1008-X.
- Biedermann, H. (2015): Die Arbeitsorganisation in der Instandhaltung im Kontext zu Industrie 4.0. In: Industrie 4.0 Management, Jg. 31, Nr. 3, S. 45–48.
- Biethahn, J. et al. (1999): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. State of the Art und neuere Entwicklungen. Heidelberg: Physica-Verlag. ISBN 3-7908-1178-5.
- Blohm, H. et al. (2008): Produktionswirtschaft. 4., vollständig überarbeitete Auflage, Herne: Neue Wirtschafts-Briefe GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-482-63024-8.
- Blom Product Development Team (2007): Schnellrüsten: Auf dem Weg zur verlustfreien Produktion mit SMED. Ansbach: Centre of Excellence for TPM. ISBN 978-3-940775-02-3.
- Bonvik, A. M. et al. (1997): A comparison of production-line control mechanism. In: International Journal of Production Research, Jg. 35, Nr. 3, S. 789–804.
- Bronner, R. (1992): Komplexität. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. 3., völlig neu gestaltete Auflage, Stuttgart: Poeschl. ISBN 3-7910-8027-X, S. 1121–1130.
- Brunner, F. J. (2008): Japanische Erfolgskonzepte. Kaizen, KVP, Lean-Production-Management, total productive maintenance, Shopfloor-Management, Toyota-Production-Management. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-41527-0.
- Bundesvereinigung Logistik (BVL) (2008): Trends und Strategien in der Logistik - Globale Netzwerke im Wandel. Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen, DVV Media Group GmbH | Deutscher Verkehrs-Verlag, 2008.
- Burmeister, M. (1997): Auslegung der Verbrauchssteuerung bei vernetzter Produktion. Dissertation, Hannover: Leibniz Universität Hannover.
- Busse, T. D. (2013a): Modellbasierte Bewertung der Belastungsstreuung auf das logistische Systemverhalten. Dissertation, Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Busse, T. D. (2013b): Modellbasierte Bewertung der Belastungsstreuung auf das logistische Systemverhalten. Garbsen: TEWISS-Technik und Wissen. ISBN 978-3-944586-28-1.
- Busse, T. D. et al. (2012): Belastungsstreuung in der Produktion. In: ZWF, Jg. 107, Nr. 10, S. 722–726.
- Chalmers, A. F. (2007): Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie. 6., verbesserte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-49490-1.
- Corsten, H.; Reiß, M. (1989): Betriebswirtschaftliche Vergleichsformen. In: Das Wirtschaftsstudium, Jg. 18, S. 615–620.
- Dangelmaier, W.; Laroque, C. (2015): Simulation. Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik. URL: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Simulation/index.html> (Zugriff: 04.08.2015).
- Dennis, D.; Meredith, J. (2000): An Empirical Analysis of Process Industry Transformation Systems. In: Management Science, Jg. 46, Nr. 8, S. 1085–1099.
- Dettmer, H. W. (1997): Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Milwaukee: ASQ Quality Press. ISBN 978-0-87389-370-1.
- Deuse, J.; Deckert, C. (2006): Lean Steel Production - Schlanke Produktionsprozesse in der Stahlindustrie. In: stahl und eisen, Jg. 126, Nr. 6, S. 84–86.
- Domschke, W.; Scholl, A. (2000): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Domschke, W. et al. (1997): Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 3-540-63560-2.

- Dreher, C. et al. (1995): Neue Produktionskonzepte in der deutschen Industrie. Bestandsaufnahme, Analyse und wirtschaftspolitische Implikationen. Heidelberg: Physica-Verlag. ISBN 3-7908-0886-5.
- Dyckhoff, H. (2000): Grundzüge der Produktionswirtschaft: Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung. 3., überarbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 3-540-67151-X.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T. (2007): Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. 2., verbesserte Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 978-3-540-72217-5.
- Ebel, B. (2001): Qualitätsmanagement. Konzepte des Qualitätsmanagements, Organisation und Führung, Ressourcenmanagement und Wertschöpfung. Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe. ISBN 3-482-51431-3.
- Eisenführ, F.; Weber, M. (2003): Rationales Entscheiden. 4., neu bearbeitete Auflage, Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-44023-9.
- Engel, F. (1981): Entscheidungsorientierte Finanzierung. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH. ISBN 3-17-005312-4.
- Erdlenbruch, B. (1991): Aufbau eines Fertigungssteuerungssystems zur Kapazitäts-, Durchlaufzeit- und Bestandsplanung. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Anwendung der Belastungsorientierten Fertigungssteuerung. München, Wien: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-15960-6, S. 195–212.
- Eversheim, W. (1992): Flexible Produktionssysteme. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. 3., völlig neu gestaltete Auflage, Stuttgart: Poeschl. ISBN 3-7910-8027-X, S. 2058–2066.
- Fettke, P. (2012): Architektur integrierter Informationssysteme — Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik. Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. URL: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/datenwissen/Informationsmanagement/Business-Engineering/-Business-Engineering--Ansatze-des/Architektur-integrierter-Informationssysteme-/index.html/?searchterm=aris> (Zugriff: 29.04.2015).
- Fleisch, E. et al. (2005): Die betriebswirtschaftliche Vision des Internet der Dinge. In: Fleisch, E.; Friedemann, M. (Hrsg.): Das Internet der Dinge. Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-24003-9, S. 3–37.
- Framinan, J. M. et al. (2003): The CONWIP production control system: Review and research issues. In: Production Planning & Control: The Management of Operations, Jg. 14, Nr. 3, S. 255–265.
- Frank, M. (1999): Modellierung und Simulation - Terminologische Probleme. In: Biethahn, J.; Hummeltenberg, W.; Schmidt, B.; Stähly, P.; Witte, T. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. State of the Art und neuere Entwicklungen. Heidelberg: Physica-Verlag. ISBN 3-7908-1178-5, S. 50–64.
- Fransoo, J. C.; Rutten, W. G. (1994): A Typology of Production Control Situations in Process Industries. In: International Journal of Operations & Production Management, Jg. 14, Nr. 12, S. 47–57.
- Frehr, H.-U. (1993): Total Quality Management. Unternehmensweite Qualitätsverbesserung. München, Wien: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-17135-5.
- Friemann, F. et al. (2015): Einflussfaktoren und Ausrichtung von Produktionsstrukturen in der Prozessindustrie. In: WINGbusiness, Jg. 1, S. 30–35.

- Fröhling, M. (2006): Zur taktisch-operativen Planung stoffstrombasierter Produktionssysteme: Dargestellt an Beispielen aus der stoffumwandelnden Industrie. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. ISBN 3-8350-0449-2.
- Gal, T.; Gehring, H. (1981): Betriebswirtschaftliche Planungs- und Entscheidungstechniken. Berlin, New York: Verlag de Gruyter. ISBN 3-11-008315-9.
- Ganschar, O. et al. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-0570-7.
- Gleich, R. (2011): Performance Measurement. Konzepte, Fallstudien und Grundschema für die Praxis. 2., völlig überarbeitete Auflage, München: Vahlen. ISBN 978-3-8006-3758-4.
- Goldratt, E. M.; Cox, J. (2002): Das Ziel. Ein Roman über Prozessoptimierung. 3. Auflage, Frankfurt, New York: Campus Verlag. ISBN 3-593-36701-7.
- Gorecki, P.; Pautsch, P. (2014): Praxisbuch Lean Management. Der Weg zur operativen Excellence. Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-44286-3.
- Graf, G. (1996): Das Phänomen Lean Management. Eine kritische Analyse. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. ISBN 3-8244-6351-2.
- Gross, D. et al. (2008): Fundamentals of Queueing Theory. 4. Auflage, New York: Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-79127-0.
- Gudehus, T. (2012): Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-29358-0.
- Gupta, M. C.; Boyd, L. H. (2008): Theory of constraints: a theory for operations management. In: International Journal of Operations & Production Management, Jg. 28, Nr. 10, S. 991–1012.
- Gutenberg, E. (1983): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktion. 24., unveränderte Auflage, Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-05694-7.
- Günther, H.-O. (2004): Produktionsplanung in der Prozessindustrie. In: WiSt, Jg. Heft 6, S. 326–331.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. (2005): Produktion und Logistik. 6., verbesserte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-23246-X.
- Haberfellner, R. et al. (2012): Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. 12., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Zürich: Orell Füssli. ISBN 978-3-280-04068-3.
- Hartmann, E. H. (1995): Erfolgreiche Einführung von TPM in nichtjapanischen Unternehmen. Landsberg: verlag moderne industrie. ISBN 3-478-91370-5.
- Hartmann, E. H. (2007): TPM. Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, München: FinanzBuch Verlag. ISBN 978-3-636-03088-7.
- Hartmann, W. et al. (2009): The Impact of Priority Rules on Logistic Objectives: Modeling with the Logistic Operating Curves. Proceedings of World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 2009. San Francisco, USA.
- Hedtstück, U. (2013): Simulation diskreter Prozesse. Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-34870-9.
- Heinen, E. (1969): Zum Wissenschaftsprogramm der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 39, Nr. 4, S. 207–220.
- Heinen, E. (1971): Der entscheidungsorientierte Ansatz der Betriebswirtschaftslehre. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 41, Nr. 7, S. 429–444.
- Heinen, E. (1978): Industriebetriebslehre als Entscheidungslehre. In: Heinen, E. (Hrsg.): Industriebetriebslehre. Entscheidungen im Industriebetrieb. 6., verbesserte Auflage, Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-33148-4, S. 25–82.

- Heinen, E. (1991): Industriebetriebslehre als entscheidungsorientierte Unternehmensführung. In: Heinen, E. (Hrsg.): Industriebetriebslehre. Entscheidungen im Industriebetrieb. 9., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-33152-2, S. 1–72.
- Heiserich, O.-E. (2000): Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 3-409-22238-3.
- Hirschberg, A. (1998): Effizienz steigern mit Simulation. In: Ablaufsimulation. Anlagen effizient und sicher planen und betreiben. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft. ISBN 3-931327-35-3.
- Homburg, C. (1998): Quantitative Betriebswirtschaftslehre: Entscheidungsunterstützung durch Modelle. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-23417-9.
- Hopfenbeck, W. (1997): Allgemeine Betriebswirtschafts- und Managementlehre: Das Unternehmen im Spannungsfeld zwischen ökonomischen, sozialen und ökologischen Interessen. 11. Auflage, Landsberg/Lech: moderne Industrie. ISBN 3-478-39872-X.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2001): Factory Physics. Foundations of Manufacturing Management. 2. Auflage, Singapur: Irwin/McGraw-Hill. ISBN 0-07-116378-6.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2004): To Pull or Not to Pull: What Is the Question? In: Manufacturing & Service Operations Management, Jg. 6, Nr. 2, S. 133–148.
- Huch, B. et al. (1995): Rechnungswesenorientiertes Controlling. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Heidelberg: Physica-Verlag. ISBN 978-3-7908-0865-0.
- Inderfurth, K.; Schulz, T. (2006): Lagerhaltungstheoretische Analyse der Lagerkennlinien nach Nyhuis/Wiendahl. Dissertation, Magdeburg: Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Inderfurth, K.; Schulz, T. (2008): Zur optimalen Parametrisierung der Lagerkennlinie nach Nyhuis/Wiendahl. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-75641-5, S. 157–183.
- Jodlbauer, H. (2008): Produktionsoptimierung. Springer. ISBN 978-3-211-78141-8.
- Jöbstl, O. (1999): Einsatz von Qualitätsinstrumenten und -methoden. Ein Anwendungsmodell für Dienstleistungen am Beispiel der Instandhaltung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. ISBN 3-8244-0487-7.
- Kamiske, G. F. (2012): Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. ISBN 978-3-446-42019-9.
- Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P. (2012): ABC des Qualitätsmanagements. Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-43180-5.
- Kendall, D. G. (1953): Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. In: The Annals of Mathematical Statistics, Jg. 24, Nr. 3, S. 338–354.
- Kerner, A. (2002): Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Dissertation, Hannover: Universität Hannover.
- Kiencke, U. (2006): Ereignisdiskrete Systeme. Oldenburg: Wissenschaftsverlag. ISBN 978-3-486-58011-2.
- Kirchof, R. (2003): Ganzheitliches Komplexitätsmanagement: Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. ISBN 3-8244-7742-4.
- Kistner, K.-P. (1987): Warteschlangentheorie. In: Gal, T. (Hrsg.): Grundlagen des Operations Research. 3. Spieltheorie, Dynamische Optimierung, Lagerhaltung, Warteschlangentheorie,

- Simulation, Unschärfe Entscheidungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. ISBN 978-642-97003-0, S. 253–289.
- Kleindienst, B. et al. (2015): Effizient in der Produktion. Potenziale zur Optimierung der Produktion durch die richtigen Kennzahlen erkennen und nutzen. In: Industrie 4.0 Management, Jg. 31, Nr. 5, S. 13–16.
- Klevers, T. (2007): Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design. Verschwendung vermeiden - Wertschöpfung steigern. Landsberg/Lech: mi-Fachbuchverlag. ISBN 978-3-636-03097-9.
- Knössl, T. (2014): Logistikorientierte Wertstromanalyse. In: Günthner, W. A.; Boppert, J. (Hrsg.): Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-37326-8, S. 135–144.
- Kosturiak, J.; Gregor, M. (1995): Simulation von Produktionssystemen. Wien, New York: Springer. ISBN 3-211-82701-3.
- Krauth, J. (1992): Comparison 2: Preliminary Evaluation. Proceedings of EUROSIM - Simulation News Europe, mars 1992.
- Kromrey, H. (2002): Empirische Sozialforschung: Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung. 10. Auflage, Opladen: Leske + Budrich. ISBN 978-9-8100-3701-5.
- Kudlich, T. (2000): Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation, München: Technische Universität München.
- Kuhn, A.; Hellingrath, B. (2006): Instrumente und Methoden für das Kooperationsmanagement in Logistiknetzwerken. In: Innovative Kooperationsnetzwerke. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. ISBN 978-3-8350-9307-2.
- Lindinger, C.; Zeisel, N. (2013): Spitzenleistung durch Leadership. Die Bausteine ergebnis- und mitarbeiterorientierter Führung. Wiesbaden: Springer. ISBN 978-3-658-01486-5.
- Little, J. D. C. (1961): A Proof for the Queuing Formula $L = \lambda W$. In: Operations Research, Jg. 9, Nr. 3, S. 383–387.
- Loos, P. (1997): Produktionslogistik in der chemischen Industrie: Betriebstypologische Merkmale und Informationsstrukturen. Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-12323-7.
- Lorenz, W. (1984): Entwicklung eines arbeitsstundenorientierten Warteschlangenmodells zur Prozeßabbildung der Werkstattfertigung. Dissertation, Hannover: Leibniz Universität Hannover.
- Lucas, K. (2007): Thermodynamik: Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen. 6., bearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 978-3-540-73515-1.
- Lusti, M. (1999): Data Warehousing und Data Mining. Eine Einführung in entscheidungsunterstützende Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lödding, H. (2004): Verfahren der Fertigungssteuerung. Springer.
- Lödding, H. (2008): Ein Modell der Fertigungssteuerung — Logistische Ziele systematisch erreichen. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-75641-5, S. 219–233.
- Lödding, H. et al. (2001): Dimensionierung und Bewertung von Fertigungsinseln mit logistischen Kennlinien. In: io new management.
- Löschner, J. et al. (2006): Overall Equipment Effectiveness (OEE) als Steuerungsinstrument in Produktionssystemen. Komplexitätsbeherrschung bei verketteten Aggregaten. In: Komplexitätsorientiertes Anlagenmanagement. Köln: TÜV Media GmbH. ISBN 978-3-8249-1008-3.

- Malik, F. (2008): Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme. Neuausgabe (10. Auflage), Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. ISBN 978-3-258-07396-5.
- Martin, W. (2006): Condition Monitoring – Basis für eine Vorausschauende Instandhaltung. In: Bandow, G. (Hrsg.): Strategien zur Umsetzung moderner Instandhaltungskonzepte in der Praxis. Dortmund: Verlag Praxiswissen. ISBN 3-89957-036-7, S. 51–67.
- May, C.; Koch, A. (2008): Overall Equipment Effectiveness (OEE). Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. In: Zeitschrift für Unternehmensberatung, Jg. 6, S. 245–250.
- Menges, G. (1974): Grundmodelle wirtschaftlicher Entscheidungen. Einführung in moderne Entscheidungstheorien. 2., erweiterte Auflage, Düsseldorf: Westdeutscher Verlag GmbH. ISBN 3-531-11156-6.
- Meyer, R. (1999): Entscheidungstheorie. Ein Lehr- und Arbeitsbuch. Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-12249-4.
- Münzberg, B. et al. (2009): Kennlinien im Produktcontrolling. Implementierung der Produktionskennlinien in das laufende Produktionscontrolling eines Elektronikwerks. In: Industrie Management, Jg. 25, Nr. 5, S. 43–46.
- Möller, D. P. F. (1992): Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-95675-1.
- Mönch, L. (2006): Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. ISBN 3-8350-0249-X.
- Nachtwey, A. (2010): Methodischer Beitrag zur Betriebsanalyse komplexer Produktionssysteme. Dissertation, Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.
- Nagel, P. (1977): Systemdenken. In: Daenzer, W. (Hrsg.): Systems Engineering. Zürich: Peter Hanstein Verlag. ISBN 3-7756-6200-6, S. 10–25.
- Nakajima, S. (1995): Management der Produktionseinrichtungen (Total Productive Maintenance). Frankfurt, New York: Campus Verlag. ISBN 3-593-35164-1.
- Neuhaus, U. (2008): Reaktive Planung in der chemischen Industrie: Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-8349-9737-1.
- Nyhuis, P. (2008): Produktionskennlinien - Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-75641-5, S. 185–218.
- Nyhuis, P. (2015): Produktionskennlinien. Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. URL: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Logistische-Kennlinien/Produktionskennlinien> (Zugriff: 10.09.2015).
- Nyhuis, P.; Schmidt, M. (2011): Logistic Operating Curves in Theory and Practice. In: Schmidt, M. (Hrsg.): Advances in Computer Science and Engineering. Rijeka: InTech, S. 371–390.
- Nyhuis, P.; Vogel, M. (2005): Logistische Positionierung von One-Piece-Flow-Prozessen. In: ZWF, Jg. 100, Nr. 3, S. 99–103.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012): Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-43700-0.
- Ohno, T. (2013): Das Toyota-Produktionssystem. 3., erweiterte und aktualisierte Auflage, Frankfurt am Main: Campus Verlag. ISBN 978-3-593-42375-3.
- Panwar, A. et al. (2015): On the adoption of lean manufacturing principles in process industries. In: Production Planning & Control, Jg. 26, Nr. 7, S. 564–587.

- Rabe, M. (1998): Einführung. In: Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-63854-7.
- Rainer, C. (2010): Flexibilitätsorientierte Produktionsplanung und -steuerung bei der AMAG Rolling, 2010.
- Rainer, C. (2012): Projektbericht - Flexibilitätsorientierte Produktionsplanung und -steuerung, 2012.
- Rainer, C. (2013a): Anwendung von Data-Mining zur Ableitung von Planungsregeln in der flexibilitätsorientierten Prozessindustrie. In: Logistics Systems Engineering. 1. Wissenschaftlicher Industriegistik-Dialog in Leoben. München, Mering: Rainer Hampp Verlag. ISBN 978-3-86618-858-7, S. 45–58.
- Rainer, C. (2013b): Kollaborative Materialbedarfsplanung in der flexibilitätsorientierten Prozessindustrie. In: Zsifkovits, H.; Altendorfer, S. (Hrsg.): Logistics Systems Engineering. 1. Wissenschaftlicher Industriegistik-Dialog in Leoben. München, Mering: Rainer Hampp Verlag. ISBN 978-3-86618-858-7, S. 33–58.
- Rainer, C.; Grubmüller, C. (2013): Kollaborative Materialbedarfsplanung. Collaborative Planning in der flexibilitätsorientierten Prozessindustrie. In: Productivity Management, Jg. 18, Nr. 5, S. 23–26.
- Rasch, A. A. (2000): Erfolgspotential Instandhaltung: Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG. ISBN 3-503-05811-7.
- Reichwald, R.; Dietel, B. (1991): Produktionswirtschaft. In: Industriebetriebslehre. Entscheidungen im Industriebetrieb. 9., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-33152-2, S. 395–622.
- Reitz, A. (2008): Lean TPM: In 12 Schritten zum schlanken Managementsystem. München: mi-Fachbuchverlag. ISBN 978-3-636-03119-8.
- Rommelfanger, H.; Eickemeier, S. (2002): Entscheidungstheorie. Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-42465-9.
- Runzheimer, B. (1999): Operations Research. Lineare Planungsrechnung, Netzplantechnik, Simulation und Warteschlangentheorie. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Gabler. ISBN 3-409-30717-6.
- Rüegg-Stürm, J. (2003): Das neue St. Galler Management-Modell: Grundlagen einer integrierten Managementlehre. 2., durchgesehene Auflage, Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. ISBN 978-3-258-06629-5.
- Samac, K. (2014a): Anwendungen und Entwicklungspotentiale von Produktionskennlinien sowie Grenzen bei deren Einsatz. In: Logistische Modellierung. 2. Wissenschaftlicher Industriegistik-Dialog in Leoben (WiID). München, Mering: Rainer Hampp Verlag. ISBN 978-3-95710-015-3, S. 31–45.
- Samac, K. (2014b): Ein Vorgehenskonzept zur Senkung der Bestände innerhalb von Herstellprozessen. In: WINGbusiness, Jg. 47, Nr. 3, S. 22–25.
- Scheer, A.-W. (2000): ARIS - Business Process Modeling. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN 3-540-65835-1.
- Schenk, M. (2009): Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-03949-2.
- Schiefer, E. (2009): Wertschöpfungsorientierte Produktionsplanung und -steuerung in der Prozessindustrie: Ein Konzept zur Optimierung von logistischen Zielgrößen. Dissertation, Leoben: Montanuniversität Leoben.

- Schmidt, S. (1995): Vorwort von Stefan Schmidt. In: Nakajima, S. (Hrsg.): Management der Produktionseinrichtungen (Total Productive Maintenance). Frankfurt, New York: Campus Verlag. ISBN 3-593-35164-1, S. 4–12.
- Schneeberger, T. (2006): Systems Transformation - Kriterien und Vorgehensmodell für den Wandel zu einem ganzheitlichen Managementsystem. Dissertation, Leoben: Montanuniversität Leoben.
- Schneider, M. (2004): Logistische Fertigungsbereichskennlinien. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN 978-3-18-364702-6.
- Schneider, M. (2012): Logistische Prozesskennlinien. In: Logistische Kennzahlen: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-43700-0.
- Schnell, R. (1995): Methoden der empirischen Sozialforschung. 5., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Wien: R. Oldenbourg Verlag. (Paul B.; Esser). ISBN 3-486-23489-7.
- Scholz-Reiter, B. et al. (2008): Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-75641-5, S. 109–138.
- Schoner, P. (2007): Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Kassel: kassel university press GmbH. ISBN 978-3-89958-335-9.
- Schuh, G. et al. (2012): Einführung. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4., überarbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-25422-2, S. 3–10.
- Schweitzer, M. (1994): Gegenstand der Industriebetriebslehre. In: Industriebetriebslehre: Das Wirtschaften in Industrieunternehmen. 2., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, München: Franz Vahlen. ISBN 3-8006-1755-2, S. 3–63.
- Schömig, A. et al. (2007): Über verschiedene Ansätze zur Ermittlung von Betriebskennlinien - Eine Anwenderstudie aus der Halbleiterindustrie. In: Waldmann, K.-H.; Stocker, U. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2006. Berlin Heidelberg: Springer. , S. 467–472.
- Schönsleben, P. (2011): Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 6., bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-20380-0.
- Shingo, S. (1985): A Revolution in Manufacturing: The SMED System. New York: Productivity Press. ISBN 978-0-915299-03-4.
- Skinner, W. (1974): The focused factory. In: Harvard Business Review, S. 113–212.
- Stahle, W. (1991): Management. Eine verhaltenswissenschaftliche Perspektive. 6., überarbeitete Auflage, München: Franz Vahlen.
- Strate, O. (2002): Logistische Analyse und kennlinienunterstützte Planung von Fertigungssystemen. Aachen: Shaker Verlag. ISBN 3-8322-0799-6.
- Strunz, M. (2012): Instandhaltung. Grundlagen -Strategien - Werkstätten. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-27389-6.
- Syska, A. (1990): Kennzahlen für die Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-53296-5.
- Taylor, S. G. et al. (1981): Why the Process Industries Are Different. In: Production and Inventory Management Journal, Jg. 22, Nr. 4, S. 9–24.
- Teeuwen, B.; Schaller, C. (2011): 5S. Die Erfolgsmethode zur Arbeitsplatzorganisation. Ansbach: Centre of Excellence for TPM. ISBN 978-3-940775-08-5.

- Thommen, J.-P. (2014): Entscheidungsorientierte Betriebswirtschaftslehre. Gabler Wirtschaftslexikon. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8006/entscheidungsorientierte-betriebswirtschaftslehre-v6.html> (Zugriff: 17.06.2014).
- Thun, J.-H. (2013): Die zeitbasierte Fertigungsstrategie: Methoden zur Leistungssteigerung in Industriebetrieben. Wiesbaden: Springer-Verlag. ISBN 978-3-663-08012-1.
- Töllner, A. et al. (2010): Modelle und Modellierung. In: "Das ist gar kein Modell!": Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswissenschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler. ISBN 978-3-8349-1842-0.
- Ulrich, H. (1970): Die Unternehmung als produktives soziales System: Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre. 2., überarbeitete Auflage, Bern: Haupt.
- Ulrich, H. (2001): Systemorientiertes Management: das Werk von Hans Ulrich. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. ISBN 978-3-258-06359-1.
- VDI-Richtlinie 3633 (2013): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Voigt, K.-I. (2015): Los. Gabler Wirtschaftslexikon. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/58091/los-v5.html> (Zugriff: 07.07.2015).
- Westkämper, E. (2009): Turbulentes Umfeld von Unternehmen. In: Westkämper, E.; Zahn, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-21889-0, S. 7–23.
- Wiendahl, H.-H. (2011): Auftragsmanagement in der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-19148-0.
- Wiendahl, H.-H. (2012): Auftragsmanagement der industriellen Produktion. In: Grundlagen, Konfiguration, Einführung, Berlin, Heidelberg.
- Wiendahl, H.-P. (1987): Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung. München, Wien: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-14592-3.
- Wiendahl, H.-P. (1991): Einführung in die Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. In: Anwendung der Belastungsorientierten Fertigungssteuerung. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-15960-6, S. 1–31.
- Wiendahl, H.-P. (2012): Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. URL: <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-encyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Fertigungssteuerung/Belastungsorientierte-Auftragssteuerung> (Zugriff: 15.07.2015).
- Wiendahl, H.-P. et al. (2000): Logistische Rationalisierungspotentiale mittels flexibler Kapazitäten erschließen. In: Werkstatttechnik, Jg. 90, Nr. 4, S. 144–148.
- Wiendahl, H.-P.; Kwok-Wai, Y. (2000): Simulation und Monitoring - Monitoringsysteme zur Interpretation von Simulationsergebnissen. In: ZWF, Jg. 95, Nr. 10, S. 498–501.
- Wiendahl, H.-P.; Schneider, M. (2002): Development of a Logistic Operating Curve for an Entire Manufacturing Department. In: Inasaki, I. (Hrsg.): Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium. Springer US. ISBN 978-0-7923-7414-5, S. 882–886.
- Wiendahl, H.-P. et al. (2003): Modelling the Logistical Performance of Forging Process Chains by Means of Operating Curves. In: Production Engineering (Annals of the WGP), Jg. X (X/1), S. 119–124.
- Willmott, P. (2002): The Role of Condition Monitoring in Context of the Maintenance Function – What Techniques are Available? In: Yardley, E. D. (Hrsg.): Condition Monitoring – Engineering the Practice. Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publishing. ISBN 1-86058-361-X, S. 1–19.

- Womack, J. P. et al. (1994): Die zweite Revolution in der Autoindustrie. 8. Auflage, Frankfurt am Main: Campus Verlag. ISBN 3-593-35120-X.
- Wriggers, F. et al. (2009): Wirtschaftlich produzieren : Ermittlung wirtschaftlich und logistisch optimaler Maßnahmen. In: ZWF, Jg. 104, Nr. 5, S. 353–357.
- Wriggers, F. S. et al. (2007): Modeling and deriving strategic logistic measures. Proceedings of IEEM 2007: 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007.
- Zimmermann, H.-J. (1992): Operations Research Methoden und Modelle. Für Ingenieure, Ökonomen und Informatiker. 2., überarbeitete Auflage, Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. ISBN 3-528-18917-7.
- Züst, R. (2004): Einstieg ins Systems Engineering: Optimale, nachhaltige Lösungen entwickeln und umsetzen. 3. vollständig neu bearbeitete Auflage, Zürich: Industrielle Organisation. ISBN 978-3-85743-721-2.
- Zäpfel, G. (1993): Produktionsplanung und -steuerung in der "Fabrik der Zukunft". In: Betriebswirtschaftliche Grundlagen moderner Produktionsstrukturen. Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe. .