ETH zürich

ETH Library

Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme

Doctoral Thesis

Author(s):
Burkhalter, Jean Philippe

Publication date:
2010

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-006036433

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH Nr. 18830

STEUERUNGS- UND REGELUNGSSTRATEGIEN FÜR PRODUKTIONSTECHNISCHE SYSTEME

A B H A N D L U N G

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

JEAN PHILIPPE BURKHALTER

Dipl. Betr.- und Prod.-Ing. ETH

geboren am 05. März 1974

von Lützelflüh (BE)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Konrad Wegener
Prof. Dr. Pavel Hora
Dr. Peter Acél

2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit über Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme entstand als externe Dissertation am IWF (Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung) der ETH Zürich. Das IWF ist der fertigungstechnischen Forschung gewidmet, von den Fertigungsprozessen über die Werkzeugmaschine bis hin zur operativen Fertigungssteuerung. Gleichzeitig übte ich meine berufliche Tätigkeit als Berater bei der Dr. Acél & Partner AG aus. Die Dr. Acél & Partner AG, mit Sitz in Zürich, ist eine Beratungsfirma für Internationales Logistik Management.

Viele Personen haben mir in dieser Zeit ihre wertvolle Hilfe gegeben. Ihnen allen bin ich zu grossem Dank verpflichtet.

Mein besonderer Dank gilt meinem Hauptreferenten, Herrn Prof. Dr. Konrad Wegener, Leiter des IWF und Geschäftsführer der Inspire AG, einem Transferzentrum auf Initiative der Schweizer Industrie, für die stete und grosszügige Förderung. Die vielen Zwischenbesprechungen halfen mir, die Arbeit zielorientiert und effizient durchführen zu können.

Ein grosser Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Pavel Hora, Leiter des IVP (Insititut für virtuelle Produktion) der ETH Zürich, für die Übernahme des Korreferats. Sein Blick fürs Ganze war unersetzlich und hat massgebend dazu beigetragen, dass sich die vorliegende Arbeit an einem roten Faden orientiert.

Ebenso danke ich Herrn Dr. Peter Acél, Geschäftsführer der Dr. Acél & Partner AG und Lehrbeauftragter der ETH Zürich, für die Übernahme des Korreferats. Als Korreferenten danke ich ihm für die zahlreichen fachlichen Auseinandersetzungen, welche die Arbeit befruchteten und bereicherten. Als Vorgesetzter in der Ausübung meines Berufs danke ich ihm für die geschaffenen Freiräume, die diese Arbeit überhaupt ermöglichten.

Mein weiterer Dank gilt den Vertretern der beiden Industriepartner, die durch ihre Zeit und Offenheit zum Gelingen der vorliegenden Arbeit, insbesondere zur Verifikation der theoretischen Ergebnisse, beigetragen haben. Die im Zusammenhang mit den beiden Industrievergleichen geführten Gespräche haben Praxisorientierung und Pragmatismus in der Arbeit entscheidend gefördert. Es handelt sich bei den Vertretern namentlich, in alphabetischer Reihenfolge, um Herrn Daniel Buser (Leiter Produktion), Herrn Jürg Gurtner (Controlling / SAP Supporting), Herrn Christian Pabst (Manager Demand and Supply Chain Management), Herrn Markus Ruprecht (Director Produktion) und Herrn Daniel Stoller (Leiter AVOR und Fertigungsplanung).

Nicht zuletzt danke ich meinem privaten Umfeld. Mein Freundes- und Bekanntenkreis hat mich stets ermuntert und motiviert, was während den (glücklicherweise wenigen) Tiefpunkten aufgerichtet und während allen anderen Phasen beflügelt hat. Ebenso danke ich meinen Eltern. Sie waren immer und sind ein grosser Rückhalt. Und ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau und unserem Sohn. Durch den Verzicht auf Familienausflüge sowohl an sonnigen wie auch verregneten Sonntagen, durch die stete Aufmunterung und durch das Interesse an der Arbeit bildeten sie einen wesentlichen Motivationsfaktor.

Zürich, im Dezember 2009 Jean Philippe Burkhalter

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis
Kurzfassung / Abstract
1. Einleitung ... 1
1.1. Industrielle Praxis ... 1
1.2. Stand der Technik ... 2
1.3. Motivation ... 4
1.4. Rahmen der vorliegenden Arbeit ... 5
1.4.1. Zielsetzung der Arbeit ... 5
1.4.2. Abgrenzung der Arbeit ... 6
1.4.3. Fokussierte Fertigungsstruktur ... 7
1.4.4. Typisches Anwendungsgebiet ... 8
1.4.5. Aufbau und Gliederung der Arbeit ... 9
2. Grundlagen der Fertigungssteuerung ... 10
2.1. Funktionale Gliederung der PPS ... 10
2.1.1. Teilgebiet Produktionsplanung ... 10
2.1.2. Teilgebiet Produktionssteuerung ... 11
2.2. Definitionen ... 12
2.2.1. Gliederung des Fertigungsauftrags ... 12
2.2.2. Gliederung des Arbeitsvorgangs ... 13
2.3. Zielgrössen der Produktionslogistik ... 16
2.3.1. Die Zielgrösse Bestand ... 17
2.3.2. Die Zielgrösse Durchlaufzeit ... 19
2.3.3. Die Zielgrösse Auslastung ... 20
2.3.4. Die Zielgrösse Termintreue ... 21
2.3.5. Das Polylemma des Zielkreuzes ... 22
2.3.6. Der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung ... 23
2.4. Modellierung der logistischen Zielgrössen ... 24
2.4.1. Little's Law ... 24
2.4.2. Das Trichtermodell und Durchlaufdiagramm ... 25
2.4.3. Die Trichterformel ... 27
2.5. Die Produktionskennlinie ... 29
2.5.1. Allgemeine Interpretation der Produktionskennlinie ... 30
2.5.2. Die idealisierte Produktionskennlinie ... 32
2.5.3. Die berechnete Produktionskennlinie ... 35
3. Morphologie der Fertigungssteuerung ... 37
3.1. Vergleich von Steuerung und Regelung ... 37
3.2. Modell der Fertigungssteuerung ... 38
3.3. Das morphologische Schema ... 39
3.4. Existierende Steuerungsverfahren ... 41
3.4.1. Das MRPII-Verfahren ... 41
3.4.2. Das Kanban-Verfahren ... 46

3.4.3. Das Conwip-Verfahren ... 49
3.4.4. Das OPT-Verfahren ... 52
3.4.5. Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe ... 55
3.4.6. Das Bestellbestands-Verfahren ... 58
3.4.7. Das Fortschrittszahlen-Verfahren ... 61
3.4.8. Das Basestock-Verfahren ... 64
3.4.9. Das Polca-Verfahren ... 67
3.4.10. Die Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung ... 70
3.5. Gestaltungsgrundsätze für eine Steuerungs- und Regelungsstrategie ... 73
4. Entwurf einer Fertigungssteuerung und –regelung ... 77
4.1. Die Idee ... 77
4.2. Der Entwurf in der Morphologie ... 79
4.3. Das Arbeitssystem - Analyse der dezentralen Stellen ... 79
4.3.1. Beziehungen eines Arbeitssystems ... 80
4.3.2. Aufgaben eines Arbeitssystems ... 82
4.3.3. Zeitpunkte der Aufgabendurchführung ... 82
4.4. Schlüsselelemente des Verfahrens ... 82
4.4.1. Der Prio-Quotient ... 83
4.4.2. Der Auftragsschlupf ... 86
4.4.3. Der Steuerbestand ... 88
4.4.4. Der Blockadebestand ... 90
4.4.5. Zustände eines Arbeitssystems ... 91
4.5. Umsetzung der Aufgabenbearbeitung ... 93
4.5.1. Steuerung, Regelung und Hilfsmittel ... 93
4.5.2. Allgemeine Synchronisation der Aufgabenbearbeitung ... 94
4.5.3. Der Einsatz von Entscheidungstabellen ... 96
4.5.4. Die Aufgabengruppe Auftragsfreigabe ... 97
4.5.5. Die Aufgabengruppe Auftragsbearbeitung ... 99
4.6. Berücksichtigung aller Situationen ... 102
4.6.1. Analyse der Vollständigkeit ... 102
4.6.2. Das leere Fertigungssystem ... 107
4.7. Überblick über den Entwurf ... 108
4.7.1. Zusammenfassung der Funktionsweise ... 108
4.7.2. Charakteristiken des Verfahrens ... 109
4.7.3. Erweiterungsmöglichkeiten des Funktionsumfangs ... 109
4.7.4. Wichtige Verfahrensparameter ... 110
4.7.5. Manuelle Eingriffsmöglichkeiten ... 111
5. Umsetzung des Entwurfs ... 113
5.1. Die Simulation ... 113
5.2. Das Modellkonzpet ... 114
5.2.1. Black-Box-Betrachtung ... 114
5.2.2. Die Modellstruktur ... 115
5.2.3. Der Programmblock Eingangsgrössen ... 115

5.2.4. Der Programmblock Materialfluss ... 118
5.2.5. Der Programmblock Steuerung ... 120
5.2.6. Der Programmblock Ausgangsgrössen ... 127
5.3. Die Anwendung in der Praxis ... 128
5.3.1. Ablauf eines Industrievergleichs ... 128
5.3.2. Zulässigkeit eines Industrievergleichs ... 129
5.3.3. Der Flussgrad ... 129
5.3.4. Der erste Industrievergleich (Firma A) ... 130
5.3.5. Der zweite Industrievergleich (Firma B) ... 139
5.3.6. Zusammenfassung der beiden Industrievergleiche ... 144
6. Abschliessende Betrachtungen ... 146
6.1. Erfüllungsgrad der vorliegenden Arbeit ... 146
6.2. Potentielle Schwächen oder Defizite des Verfahrens ... 146
6.2.1. Keine Verwendung einer zentralen Zielfunktion ... 146
6.2.2. Keine Kapazitätssteuerung ... 147
6.2.3. Fehlende Losgrössenoptimierung ... 149
6.2.4. Mögliche Umsetzungshürden ... 149
6.3. Effektivität des Entwurfs ... 150
6.4. Differenzierung zu bestehenden Verfahren ... 151
6.5. Erfüllung der Gestaltungsgrundsätze ... 154
6.6. Einsatzvoraussetzungen ... 156
6.7. Offene Strategie durch Parametrierung ... 157
6.8. Ausblick ... 158
7. Literatur ... 161

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AP	Arbeitsplatz
APS	Advanced Planning System
AS	Arbeitssystem
AVG	Arbeitsvorgang
Bem.	Bemerkung
BDE	Betriebsdatenerfassung
BKT	Betriebskalendertag
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
bzw.	beziehungsweise
Conwip	Constant Work In Process
DBF	Dezentral Bestandsorientierte Fertigungsregelung
d.h.	das heisst
ERP	Enterprise Resource Planning
ET	Entscheidungstabelle
FA	Fertigungsauftrag
FIFO	First In – First Out
FP	Funktionsplatz
FSZ	Fortschrittszahlen
GGS	Gestaltungsgrundsatz
HFE	Halbfertigerzeugnis (Halbfabrikat)
i.d.R.	in der Regel
JIT	Just In Time
KOZ	Kürzeste Operationszeit
LIFO	Last In – First Out
LOZ	Längste Operationszeit
MES	Manufacturing Execution System
MRP / MRPI	Material Requirement Planning
MRPII	Manufacturing Resource Planning
MTTR	Mean Time To Repair
OPT	Optimized Production Technology
OR	Operations Research
PKL	Produktionskennlinie
Polca	Pair-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization

PPS	Produktions-Planung und –Steuerung
resp.	respektive
TPS	Toyota Production System
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
WIP	Work in Process
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichen

A	Fläche (Bestandsfläche eines Arbeitssystems) [h · BKT]
B	Bestand (in Vorgabestunden oder Mengeneinheiten) [h oder Stk.]
d	Zeitdauer [min, h oder BKT]
F	Durchschnittliche Verweildauer im System [h]
K	Kapazität [h / BKT]
L	Leistung [h / BKT]
l	Losgrösse eines Fertigungsauftrags [Stk.]
N	Durchschnittliche Anzahl Einheiten im System [Anz.]
P	Periode, Bezugszeitraum [BKT]
Q	Prio-Quotient [-]
R	Reichweite [BKT]
RS	Rückstand [h]
s	Laufvariable (in der berechneten PKL) [-]
S	Schlupfzeit [h]
t	Zeitpunkt (auf der Zeitachse) [BKT]
T	Termintreue [%]
α	Streckfaktor (in der berechneten PKL) [-]
Γ	Auslastung [%]
Δ	Abweichung (i.d.R. Terminabweichung in [BKT])
ζ	Zeitgrad (Verhältnis von gebrauchten zu geplanten Stunden) [-]
η	Limitierungsfaktor des Steuerbestands [-]
Θ	Flussgrad [-]
κ	Nachfragerate [Stk. / BKT]
λ	Durchschnittliche Ankunftsrate [Anz. / h]
ν	Dimensionierungsfaktor des Blockadebestands [-]

σ	Standardabweichung [-]
φ	Bestandszu- oder –abgang [h oder Stk.]

Indizes

AB	Abgang
AFG	Auftragsfreigabe
AFS	Auftragsfertigstellung
AS	Arbeitssystem
AVG	Arbeitsvorgang
B	Bestand
BE	Bearbeitungsende des Arbeitsvorgangs
BESCH	Beschaffung
BEV	Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorgangs
Bl	Blockade
BZ	Bearbeitungszeit
dyn	dynamisch
EZ	Einzelzeit
FA	Fertigungsauftrag
FAAb	Abgang eines Fertigungsauftrags
FAAbOG	Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung eines FA
FAAbUG	Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung eines FA
FAE	Bearbeitungsende eines Fertigungsauftrags
gew	gewichtet
i, k, m, n	Allgemeine Laufvariablen
Ist	Ist-Wert
max	maximal
min	minimal
NF	Nachfrage
Order	Bestellung
Plan	Plan-Wert
rest	restliche, verbleibende
RZ	Rüstzeit
S	Sicherheit
St	Steuerung

t	Zeitpunkt (auf der Zeitachse)
Tag	Tag
TIM	Kurzform von „timer“ (engl.: Wecker)
virt	virtuell
Z	Zielwert
ZAU	Vorgabezeit (resp. Auftragszeit) eines Arbeitsvorgangs
ZDF	Durchführungszeit
ZU	Zugang
ZUE	Übergangszeit

Dimensionsangaben

%	Prozent
Anz.	Anzahl
BKT	Betriebskalendertag
CHF	Schweizer Franken
h	Stunde
kg	Kilogramm
m	Meter
m^3	Kubikmeter
min	Minute
Stk.	Stück
t	Tonne

Kurzfassung

Produktionsunternehmen befinden sich in einem dynamischen Umfeld, das durch Werte- und Strukturwandel geprägt ist. Im sich verschärfenden Wettbewerbsdruck müssen sie um immer anspruchsvollere Kunden „buhlen“. Dadurch nimmt die Breite des Leistungsspektrums zu und die nachgefragte Menge pro Leistungseinheit ab.

Ein entscheidender Faktor, um bei zunehmender Variantenvielfalt Termin- und Liefertreue zu meistern, stellt die Effektivität der Produktionsplanung- und –steuerung (PPS) dar. Von den existierenden Verfahren eignen sich nicht alle zur Planung und Steuerung der komplexen Fertigungsstrukturen eines Variantenherstellers. Die erzielten Ergebnisse mit den eingesetzten Verfahren sind oft unbefriedigend. Eine Fertigungsdurchlaufzeit, die zehn Mal grösser ist als die effektive Bearbeitungszeit, ist keine Seltenheit.

In dieser Arbeit wird eine Steuerungs- und Regelungsstrategie für produktionstechnische Systeme entwickelt. Sie stellt keinen Ersatz für sich in Einsatz befindende PPS-Systeme dar. Sie ist als Ergänzung dieser Systeme konzipiert und wirkt im kurzfristigen Zeithorizont der PPS-Funktionen. Die Strategie baut auf der Modellierung der produktionslogistischen Zielgrössen, der Produktionskennlinie, auf. Diese stellt den mathematischen Zusammenhang zwischen Auslastung, Durchlaufzeit und Bestand der Arbeitssysteme dar. Durch die Abhängigkeiten der Zielgrössen werden Betriebspunkte in Form von Steuerbeständen definiert. Das ist die Aufgabe der Steuerungskomponente, welche periodisch durchgeführt wird. Die Regelungskomponente hält, trotz kurzfristiger und stochastischer Einflüsse, diesen Betriebspunkt pro Arbeitssystem. Das erfolgt autonom und dezentral durch die Arbeitssysteme. Der effektive Arbeitsvorrat eines Arbeitssystems im Vergleich zum Steuerbestand definiert den Zustand des Arbeitssystems. Es ergibt sich eine kosten-, durchlaufzeit- oder durchsatzoptimale Verhaltensweise der Arbeitssysteme.

Den Input für die Steuerungs- und Regelungsstrategie bilden die Fertigungsaufträge, die in der Fertigungsauftragsliste zusammengefasst sind. Diese wird durch den Planungsteil generiert. Die Funktionsart der Planung ist für die Steuerungs- und Regelungsstrategie unbedeutend. Somit können Prognose-, Verbrauchs- und Kundenaufträge in beliebigen Verhältnissen vermischt enthalten sein. Das ermöglicht ein breites Einsatzspektrum der Steuerungs- und Regelungsstrategie. Sie orientiert sich ausschliesslich an den Sollendterminen der Fertigungsaufträge. Allfällige Planstarttermine und/oder geplante Arbeitsvorgangstermine werden nicht verwendet. Entsprechend wirken sich die oftmals fehlerbehafteten, statischen Übergangszeiten, welche im Planungsablauf eingesetzt werden, nicht auf den Fertigungsablauf aus. Der Verzicht auf Plantermine wird durch einen Prio-Quotienten pro Fertigungsauftrag erreicht. Er ist definiert als Verhältniszahl aus verbleibender Zeit bis zum Sollendtermin des Fertigungsauftrags und der dynamischen Durchlaufzeit. In der dynamischen Durchlaufzeit werden die Bestandssituationen der entsprechenden Arbeitssysteme berücksichtigt. Der Prio-Quotient wird ereignisorientiert aktualisiert.

Die Effektivität der Steuerungs- und Regelungsstrategie wird mit zwei Industrievergleichen aus unterschiedlichen Branchen nachgewiesen. Dazu wird das Verfahren in einem Simulationswerkzeug abgebildet. Mit realen Fertigungsauftragsdaten werden Simulationsexperimente durchgeführt. Im Vergleich mit den in der Praxis erzielten Ergebnissen kann ein Durchlaufzeitpotential von über 60 % ausgewiesen und im einen Fall die Termintreue um den Faktor 8 gesteigert werden.

Die vorliegende Arbeit stellt im Verständnis einer Verfahrensmethode eine in sich geschlossene und einsatzbereite Lösung dar. Im Sinne einer Strategie ist die Verfahrensmethode offen und erlaubt eine, den strategischen Zielvorgaben der Unternehmung entsprechende, Parametrierung.

Abstract

Production firms find themselves in a dynamic sphere that is characterized by a constant change of values und structures. Under the increasing competitive pressure they have to compete for clients ever harder to please. Thus the range of services gets wider and the demanded quantity per production unit decreases.

A decisive factor to master the delivery reliability and the delivery dependability while the number of variants is on the increase is the efficiency of the production planning and control (PPS). Not all of the existing procedures suit the planning and controlling of complex assembly structures a producer of variants is in need of. The attained results with the procedures that are designed for it are often dissatisfactory. A manufacturing throughput time that takes ten times longer than the effective operation time is not uncommon.

In this thesis a control and regulation strategy for production related systems is developed. It does not represent an alternative for PPS-systems that are in use at present. It is a complementary module for the short term horizon of the PPS functions. The strategy is based on the modelling of production logistics target variables, the characteristic production line. That represents the mathematic interrelationship between capacity utilisation, throughput time and work on hand of the work systems. Through the dependencies of the target variables operating points can be defined as control assets. This is the task of the control component, which is carried out periodically. In spite of short-run and stochastic impacts the regulation component keeps up this operating point per work system. This is done autonomously and locally by the work systems. The actual work in process of a work system compared to the control asset defines the state of a work system. Thus an optimal behaviour pattern of the work system results, optimal related to costs, throughput time and throughput.

The inputs for the control and regulation strategy are the production orders that are contained in the production job list, which is generated by the planning part. The operation type of the planning is unimportant for the control and regulation strategy. Thus forecast, consumption and customer orders can be contained in any relation. This allows a broad application range of the control and regulation strategy. It gears the decisions exclusively to the target finish dates of the production orders. Possible planning start dates and / or operation deadlines are not used. Accordingly the often defective static transit times that are inserted in the planning process do not have an effect on the production process. The abandonment of planning deadlines is made possible by the priority quotient per production order. It is defined as the ratio of the remaining time to the set deadline and of the dynamic throughput time. In the dynamic throuput time the work in process level of each work system is considered. The priority quotient is updated event-orientedly.

The efficiency of the control and regulation strategy is demonstrated by two industry comparisons from differing industrial sectors. To this end the approach is represented by a simulation tool. The simulation experiments are carried out with data of real production orders. In comparison to results obtained in practice the potential of a throughput time of more than 60 % can be accounted for and in one case the delivery reliability has increased by factor 8.

In the understanding of a method this paper forms a closed and ready for use solution. In the sense of a strategy the method is open and offers a case-specific parameterization, according to the strategic objectives of the company.

1. Einleitung

1.1. Industrielle Praxis

Fertigungsunternehmen befinden sich durch den Werte- und Strukturwandel der Gesellschaft, durch Änderungen politischer Randbedingungen sowie durch wissenschaftliche Neuerungen und technologische Fortschritte in einem Umfeld von dynamischen Marktbedingungen. Der Wandel vom Hersteller- zum Käufermarkt ist ein vollzogener und abgeschlossener Akt aus den 90er-Jahren. Die daraus resultierenden gesättigten regionalen Märkte in Kombination mit dem Fortschritt in der Kommunikationstechnologie bewirkten die weltweite Ausweitung der Vertriebsaktivitäten. Zum einen ergeben sich durch die Globalisierung zwar Chancen eines vergrösserten Beschaffungs- und Absatzmarktes, zum andern nimmt jedoch der Konkurrenzdruck deutlich zu. In den letzten sechs Jahren vor der Jahrtausendwende wurden die Unternehmen mit bis zu 50 % mehr Wettbewerbern konfrontiert [MOR99].

Das Zusammenwirken der oben aufgeführten Faktoren führt dazu, dass die Unternehmen unter einem zunehmenden Wettbewerbs-Druck um immer anspruchsvollere Kunden „buhlen“ müssen. Der Kundenanspruch nach starkem Ausdruck von Individualität sowie die Selbstverständlichkeit einer präzisen Termineinhaltung bei immer günstigeren Preisen und noch kürzeren Lieferfristen bedeutet auch für Hersteller einer variantenreichen Produktpalette, diese zunehmend schneller und zielgerichteter anbieten zu müssen. Um am turbulenten Markt wettbewerbsfähig zu sein, gilt es die Vielfalt auch fertigungstechnisch optimal zu beherrschen.

Die Produktion umfasst alle wesentlichen Elemente der Wertschöpfungskette und hat so für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens eine zentrale Bedeutung [EID91]. Demnach ist die Beherrschung bzw. Steuerung des Herstellprozesses mitentscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Produktion und legt damit auch massgeblich die resultierenden Produktkosten fest. Dies wiederum beeinflusst die Positionierung der Unternehmung im Kostenwettbewerb oder kann zum Standortentscheid der Fertigung beitragen. Solche Wirkkräfte sind insbesondere in Ländern mit hohen Lohnkostenstrukturen wie beispielsweise der Schweiz von grosser Bedeutung. Die Industrie beginnt allerdings alternativ zur Standortverlagerung in Niedriglohnländer die Kundennähe der Produktion in einem Hochlohnland als Wettbewerbsvorteil zu erkennen [MEY07]. Während Produktionsverlagerungen ins Ausland rückläufig sind folgt auf jede vierte bis fünfte Auslagerung eine Rückverlagerung [KIN09]. Dazu verstärkt die Industrie die Bemühungen zur Flexibilisierung der Produktion, um die regionale Vielfalt zu konkurrenzfähigen Preisen beherrschen zu können.

Der Wechsel vom Hersteller- zum Käufermarkt während der 90er-Jahre wurde bereits erwähnt. Dieser Umbruch stellte aus Sicht der Unternehmen eine elementare Umweltveränderung dar. In der Lehre ist dieser Wandel vollzogen. Die betrieblichen Konsequenzen allerdings, welche sich in einer Gewichtsverschiebung der produktionslogistischen Zielgrössen äussern, stellen in der Praxis nach wie vor eine gewisse Herausforderung dar. Somit bergen sie auch in der Gegenwart ein nicht zu vernachlässigendes Optimierungspotential in sich.

Die Gründe, warum die betrieblichen Konsequenzen immer noch eine gewisse Herausforderung darstellen, lassen sich grob und übergeordnet in zwei Sachverhalte zusammenfassen:

- *Trägheit:* Das für die Produktion eingesetzte Hilfsmittel „PPS-System“ basiert heute in Europa in der Regel auf dem MRPII-Prinzip. Dieses Prinzip beinhaltet einen Planungsablauf, der plan- und kontrollierbare Produktionsprozesse erfordert [REI02]. Diese Voraussetzung ist für das dynamische Umfeld einer Unternehmung und die stochastischen Störgrössen in der Produktion ungeeignet, da diese Voraussetzung die Situation in den meisten Fällen nur unbefriedigend pariert.

- *Starrheit:* Anstelle einer sequentiellen Einzeloptimierung der produktionslogistischen Zielgrössen erfordert die Situation eine gesamthafte und durchgängige Berücksichtigung. Anstatt statischer Zielwertvorgaben ist eine situative, von der Auftragslage abhängige und somit absatzmarktspezifische, Zielwertanpassung erforderlich.

1.2. Stand der Technik

Die Aufgaben zur Planung und Abwicklung der Fertigungsabläufe werden unter dem Begriff *Produktionsplanung und –steuerung (PPS)* zusammengefasst. Da die PPS-Aufgaben sehr vielfältig und komplex sind, ausserdem auch noch in grossen Mengen und hohen Frequenzen abgearbeitet werden müssen, setzt man zur Bearbeitung Software-Produkte als Hilfsmittel ein. Diese Softwarepakete heissen PPS-Module. Ein PPS-Modul, das aufgrund des grossen Funktionsumfangs oft auch PPS-System genannt wird, ist Bestandteil eines ERP-Systems (Enterprise Resource Planning). ERP-Systeme setzen sich aus mehreren Modulen zusammen und ermöglichen somit die Ausführung oder zumindest die datentechnische Unterstützung sämtlicher Geschäftsprozesse (Integration). So kann z.B. ein Versandauftrag aus dem Modul Distribution und im Status „Empfangsbestätigung erhalten“ durch das Finanz- und Rechnungswesen-Modul fakturiert werden.

Die in der Praxis eingesetzten PPS-Systeme basieren in der Regel auf dem MRPII-Prinzip (Manufacturing Resource Planning). Das MRPII-Verfahren wird in Abschnitt 3.4.1 detailliert beschrieben. Es funktioniert nach dem Push-Prinzip. D.h., dass an zentraler Stelle mittels einer mehrstufigen, sukzessiven Planung Subaufträge für die einzelnen Arbeitssysteme erzeugt werden. Diese Subaufträge, je mit einem Starttermin versehen, werden gleichzeitig an die Arbeitssysteme übergeben. Durch diese Zuteilung wird das Geschehen an den Arbeitssystemen angeschoben (push) [GUD07]. Das Bearbeitungsergebnis eines Arbeitssystems wird unverzüglich und ohne Berücksichtigung des Systemzustands an den Nachfolger weitergegeben. Klassische MRPII-Systeme sind in der Regel ungeeignet, eine schnelle und flexible Handhabung der Fertigungsprozesse zu übernehmen, da die dazu erforderliche Prozessnähe nicht gegeben ist [VDI5600]. Sie berücksichtigen den kurzfristigen Zeithorizont und somit insbesondere auch die unterschiedlichen (teils stochastischen) Einflüsse auf den Fertigungsablauf wie z.B. Maschinenausfälle, Nacharbeiten, usw. zu wenig [MEY07]. Schmidheiny [SCH93] nennt als Beispiel eines weiteren, kurzfristigen Einflusses die Auswirkung von Eilaufträgen auf das restliche Auftragsspektrum. Die Reaktion auf solche Störungen des betrieblichen Ablaufs erfolgt in der Regel in der Fertigung intuitiv, lokal und verursacht im Gesamtkontext häufig eine noch grössere Beeinträchtigungen des Ablaufs und somit auch der Gesamtproduktivität. Die Steuerungsaufgabe reduziert sich im MRPII-Fall auf das Management von geplanten Start- und Endterminen im Abgleich mit dem aktuellen Zeitpunkt. Aktualisierte Plan-Termine stehen erst nach einem erneuten Planungsdurchlauf zur Verfügung.

Bereits zu Beginn der Käufermarkt-Epoche haben Unternehmen nach Schmidheiny [SCH93] die Erfahrung gemacht, dass sich trotz Einführung von PPS-Systemen weder die Durchlaufzeiten noch die Bestände entscheidend verringert haben. Scheel [SCH90] schreibt, dass die meisten unerfüllten Bestrebungen nach kürzeren Durchlaufzeiten und verbesserter Termintreue darauf zurückzuführen sind, dass die Ansätze in PPS-Systemen die Lösung des Problems gar nicht ermöglichen. Pape [PAP90] führt auf, dass PPS-Systeme nicht logistikgerecht ausgebildet seien. Und Dörrsam [DÖR99] hält fest, dass die Zielgrösse bzw. die Güte von Planungs- und Steuerungssystemen nach dem MRPII-Modell als maximale Auslastung von Maschinen gegeben sei. Dabei werden zufällige Ereignisse ignoriert und selbst das Vorhandensein einer beschränkten Kapazität wird nach derselben Quelle erst gegen Ende eines Planungsdurchlaufs berücksichtigt. Eine ressourcenbezogene Planung wurde durch Advanced Planning Systems (APS) ermöglicht [JUN07]. Die heute zu-

grunde liegende Basis der MRPII-Logik stammt aus der Ära des Verkäufermarkts und der Wechsel zum Käufermarkt wurde nicht wirklich und vollständig vollzogen.

Der Kombination von traditionellen PPS-Systemen mit kurzfristigen Steuerungsregeln wird in der betrieblichen Praxis zu wenig Rechnung getragen. Dies obwohl nach Petermann [PET96] die Forderung nach einer flexiblen Regelung von Produktionsabläufen schon lange besteht. Die frühen Ansätze basierten gemäss derselben Quelle auf der Kybernetik und versuchten gesamtheitliche Modelle für die Führung von Unternehmen aufzubauen. Die hoffungsvollen Versuche mittels OR, hier insbesondere der Warteschlangentheorie, konnten sich aufgrund der komplexen Randbedingungen einer variantenreichen Einzel- und Serienfertigung nicht durchsetzen [NYH03]. Das Aufkommen von IT-Systemen basierend auf der MRP-Philosophie Mitte der 60er-Jahre verdrängte die damaligen regelungstechnischen Ansätze und man versuchte, sämtliche Probleme durch IT zu lösen. Das MRP-Verfahren (Material Requirement Planning) bildet den Vorgänger der MRPII-Logik. Auch dieses ursprüngliche Verfahren setzte einen weitestgehend determinierbaren Produktionsprozess voraus, was zu Zeiten des Verkäufermarkts in der Regel erfüllt war, und verfolgte lediglich die Zielsetzung der Auslastungsmaximierung. Eine erneute Euphorie gipfelte nach Brankamp [BRA87] in den 80er-Jahren in der CIM-Diskussion, welche neuere regelungstechnische Ansätze wiederum zum Verstummen brachte. Die Resultate der anschliessenden Anstrengungen auf dem Gebiet der Produktionsregelung in den 90er-Jahren sind auf das jeweilige Einsatzgebiet bezogen oft massiv einschränkend ausgelegt, nur angedacht, beschäftigen sich lediglich mit Teilaufgaben und/oder finden aufgrund zahlreicher Randbedingungen und akademischer Handhabung selten Eingang in die Praxisrealität. Ausserdem befinden sich diese Verfahren meist noch im prototypischen Stadium. Funktionstest und Verfahrensbeurteilungen wurden in der Regel nur an relativ einfachen Beispielen vorgenommen [MAR98].

In der Zwischenzeit wurden durch die Anbieter von PPS-Systemen intensive Anstrengungen unternommen, um die aufgezeigten Defizite zu beseitigen. Ein besonderes Augenmerk galt dem unidirektionalen Planungsablauf ohne Informationsrückfluss. So wurde z.B. der Leitstand als zusätzliches Element zwischen der Planung und Steuerung institutionalisiert und mit einem MES-System (Manufacturing Execution System) ausgestattet. Im Fokus steht die schnelle Reaktion auf Ereignisse im Produktionsprozess sowie kurzfristige Auftragsänderungen [KLE09]. Alle Planungsdaten laufen aus der Planung über den Leitstand in die Werkstatt. Die betrieblichen Daten aus der Werkstatt (Ist-Daten) werden zurück in den Leitstand geführt, was die Notwendigkeit einer zeitgleichen Betriebsdatenerfassung förderte. Diese Konstellation des Informationsflusses kommt einer gewöhnlichen regelungstechnischen Rückkopplung gleich. Somit stehen im Leitstand sämtliche relevanten Informationen (Plan- und Ist-Informationen) zur Verfügung und die gezwungenermassen notwendigen Eingriffe durch den Menschen zur Feinplanung und Feinsteuerung der Fertigungsabläufe werden „zentral“ und zeitnah vorgenommen, jedoch manuell im Planungsteil nachgepflegt. Diese Pflege wird zunehmend durch MES-Systeme unterstützt [KLE09].

Einige Unternehmen „bekämpfen“ die Symptome verstärkt durch Terminjäger. Die Terminjäger stellen die Schnittstelle zwischen Planung und Echtbetrieb dar und gleichen ständig die Daten und Zustände ab respektive sind bemüht, deckungsgleiche Zustände zu schaffen. Mit dieser Massnahme wird primär die Reaktionsgeschwindigkeit verbessert. Die bereits erwähnten Probleme eines fehlenden Gesamtüberblicks sowie die situative und lokale Optimierung der Zielgrössen bleiben jedoch bestehen. Dieser Umstand verschärft sich teilweise gar, da einzelne Fertigungsaufträge auf Kosten anderer beschleunigt werden und die Streuung der Durchlaufzeiten ansteigt.

Ein anderer Entwicklungsschritt war die Erweiterung der PPS-Systeme um „APS“. Das Konzept des Supply Chain Managements hat die Praxis dafür sensibilisiert, dass es nicht länger ausreicht,

einzelne Produktionsstätten zu optimieren [HAN06]. APS-Systeme bezwecken also eine horizontale Integration der PPS-Systeme innerhalb der Supply Chain und stellen somit keinen Substitut für bestehende PPS-Systeme dar [COR01]. APS-Systeme bieten auch eine vertikale Echtzeitverbindung und versuchen, die Planungsschritte zu synchronisieren [JUN07]. Die Abgrenzungslinie der vertikalen Tiefe ist nicht nur abhängig vom Softwaresystem, sondern auch von der konkreten Implementierung [COR01]. Davon abhängig ist die Durchführung einer ressourcenbezogenen Planung von Beginn an [JUN07]. Da jedoch in jedem Fall die stufenweise Planung fundamentaler Bestandteil der MRPII-Logik bleibt, führt auch der Einsatz von APS nicht zum gewünschten Erfolg.

Bei all diesen Bestrebungen handelt es sich stets nur um die Bekämpfung von Symptomen und es werden nicht die Ursachen respektive die Wurzeln der Problematik angepackt. Ein anschaulicher Vergleich zu diesen Bestrebungen ist beispielsweise der Sensor bei einer Strassenkreuzungsampel, welcher wartende Autos detektieren kann: die Einführung eines solchen Sensors verbessert die „Abfertigung“ an der Kreuzung wesentlich. Der Charakter der Ampelsteuerung allerdings bleibt derselbe: eine zentrale und übergeordnete Steuerung. Bei diesem Vergleich soll nicht die Qualität einer zentralen Steuerung in Frage gestellt werden. Es soll verdeutlicht werden, dass der Optimierung im gegebenen Rahmen (zentrale Ampelsteuerung) Grenzen gesetzt sind.

Mehr als eine Symptombekämpfung, sondern eine wahre Revolution, stellt der Fertigungsgrundsatz nach dem Toyota Production System (TPS) dar. Dieser Ansatz aus Japan baut im Unterschied zur MPRII-Logik auf dem Pull-Prinzip auf. Das Pull-Prinzip zeichnet sich dadurch aus, dass ein Bearbeitungsergebnis erst dann weitergegeben wird, wenn dies vom folgenden Arbeitssystem verlangt wird. Auf diese Weise wird ein Fertigungsauftrag, beginnend beim letzten Arbeitssystem, durch die Kette der Arbeitssysteme gezogen (pull) [GUD07]. Weiter unterscheidet sich das TPS in der Zielgrössenorientierung und ist fokussiert auf schlanke Ablaufprinzipien. Das bedeutet, dass die Ware in Arbeit auf einem niedrigen Bestandsniveau und im Fluss gehalten wird. Dafür werden allfällige Auslastungsverluste in Kauf genommen. Gründe, weshalb dieses Prinzip in Europa und USA nur geringe Verbreitung findet, sind vielschichtig. Ein wesentlicher Grund liegt in der Einschränkung durch die Einsatzvoraussetzungen, welche das TPS stellt: der Ansatz eignet sich für variantenreiche Kleinserienfertiger nur beschränkt. Auch Softfaktoren wie der Aspekt der unterschiedlichen Kulturen ist nicht zu vernachlässigen: das in Europa und USA herrschende Streben nach Planbarkeit von komplexen, das menschliche Vorstellungsvermögen übersteigenden, Wirkungszusammenhängen entsprechen nicht den Grundprinzipien des TPS. Ebenso unterscheiden sich Schuld- und Verantwortungsbewusstsein sowie das Absicherungsbedürfnis durch Systeme.

Am bildhaften Beispiel der oben aufgeführten Strassenkreuzung stellt der TPS-Ansatz im Unterschied zur Ampelsteuerung die Regelung des Strassenverkehrs mittels eines Kreisverkehrs dar. Er baut auf grundsätzlich anderen Charaktereigenschaften auf: eine echte Bedarfsorientierung und dezentrale Intelligenz mit einfachen, aber konsequenten Ablauf-Regeln. Dies setzt eine Veränderung der Randbedingungen voraus. Als Randbedingungen sind in diesem Fall die Strassenführung zu verstehen sowie auch die Einführung der Verkehrsregel, dass Fahrzeuge im Kreisverkehr Vorfahrt haben. Letztere betrifft alle Nutzer[1] (Anwender) eines Kreisverkehrs.

1.3. Motivation

In der betrieblichen Praxis werden steuernde Eingriffe in Produktionssysteme eher intuitiv vorgenommen, d.h. nur unter Rücksichtnahme der unmittelbar einsichtigen Konsequenzen. Die Folgen

[1] Mit dem Term sind sowohl weibliche wie auch männliche Nutzer zu verstehen. Dies gilt im Weiteren für alle Fälle, wo das Geschlecht unterschieden werden kann, ohne wiederholt darauf aufmerksam zu machen.

für das deutlich komplexere Gesamtsystem werden aufgrund der unüberschaubaren Anzahl Parameter nicht berücksichtigt. Fertigungstechnische Anlagenverbünde sind komplizierte, verkoppelte, nichtlineare und dynamische Systeme für sich selbst sowie auch in der Interaktion mit ihrer Umwelt [WOR03]. Häufig reagieren sie im Gesamten auf diese lokalen und intuitiven Steuereingriffe mit schlechteren Ergebnissen bezüglich der produktionslogistischen Kenngrössen. Nach Eversheim [EVE02] sind die zu berücksichtigenden Zielsetzungen und Anforderungen weder widerspruchsfrei noch lokal und sie sind nur temporär gleich bleibend. Versucht man eine der Zielgrössen zu maximieren, werden die Erfüllungsgrade der anderen Zielgrössen in der Regel deutlich verschlechtert. Mit Hilfe eines ganzheitlichen Ansatzes lässt sich jedoch ein Gesamtoptimum ermitteln [EVE96]. Beträchtliche Produktivitätsreserven liessen sich identifizieren, wenn Entscheidungen über Handlungsalternativen wirklich auf alle Interaktionen, Einflüsse und Nebenwirkungen hin untersucht würden. Daraus wären entsprechende Handlungsanweisungen in einem Gesamtkontext abzuleiten. Optimale Arbeitspunkte gilt es in der Art festzulegen, dass der Betrieb auf in der Praxis unvermeidliche Störungen möglichst nicht negativ reagiert (Robustheit). In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten werden Verfahren zur optimalen Steuerung vorgestellt. Die Fähigkeit, eine variantenreiche Fertigung logistisch beherrscht steuern zu können, gewinnt an Bedeutung [LÖD08]. Zum Idealbild der PPS gehört auch softwaretechnisch die Abkehr von der starren MRPII-Philosophie hin zu mehr Flexibilität in Planung und Steuerung [LUC05]. Eine Methode zum Gestalten und Parametrieren der optimalen Steuerungs- und Regelungsstrategie eines Maschinen- bzw. Anlagenverbunds soll in der betrieblichen Praxis in Ergänzung zu den bereits betriebenen ERP/PPS-Systemen dem kurzfristigen Reaktions- und Veränderungsbedarf Rechnung tragen. Nach Schönsleben [SCH07] liegt ganz allgemein die Tendenz vor, die Produktion nicht mehr als System mit starren Randbedingungen zu betreiben (z.B. permanente Durchsatzorientierung). Vielmehr gilt es den Betriebspunkt unter Berücksichtigung des dynamsichen Umfelds festzulegen. Somit soll die Methode jeweils auf den Betrieb oder das Betriebsmodell und den aktuellen Zustand zugeschnittene Lösungen generieren.

1.4. Rahmen der vorliegenden Arbeit

1.4.1. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer für die Praxis bestimmten Methode einer Steuerungs- und Regelungsstrategie für produktionstechnische Systeme. Die Steuer- und Regelungsstrategie richtet sich nach den Vorgaben des ERP/PPS-Systems (Output) und wirkt im kurzfristigen Zeithorizont als Ergänzung zum Steuerungsteil des PPS-Systems. Die Methode stellt somit ein Ergänzungsmodul zu bestehenden PPS-Systemen dar und in keiner Weise einen Ersatz eines solchen Systems. Dieses Verständnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Qualität der Steuerungs- und Regelungsstrategie wird anhand der produktionslogistischen Zielgrössen gemessen.

Die Steuerungsstrategie legt den gewollten Arbeitspunkt des Systems fest. Die Systemlast bildet die aktuelle Auftragslage, welche durch die Planung vorgegeben wird. Dazu sind sowohl Prognoseaufträge, Kundenaufträge und auch Verbrauchsaufträge zu berücksichtigen. Die Steuerungsstrategie betrifft logistische und fertigungstechnische Abläufe und insbesondere auch die Kopplung zwischen beiden.

Es sind Regelungsstrategien, die trotz stochastischer Einflüsse ablauforientiert den festgelegten Arbeitspunkt halten, zu entwickeln. Es gilt, das reale Layout des Betriebs und die Steuerung nach Grundsätzen der Regelungstechnik zu kombinieren. Neben Ausgangs- und Führungsgrössen sind auch die Eingriffsmöglichkeiten und Regelungsstrategien zu definieren. Mit der Ergänzung exi-

stenter ERP/PPS-Systeme durch regelungstechnisch-basierte Grundsätze soll insbesondere die kurzfristige und zielführende Reaktion auf nicht geplante bzw. variierende Einflussgrössen ermöglicht werden. Damit soll sich - trotz ändernden Randbedingungen des Fertigungssystems – eine möglichst konsequente Erfüllung der Zielfunktion und damit der Fertigungsstrategie ergeben.

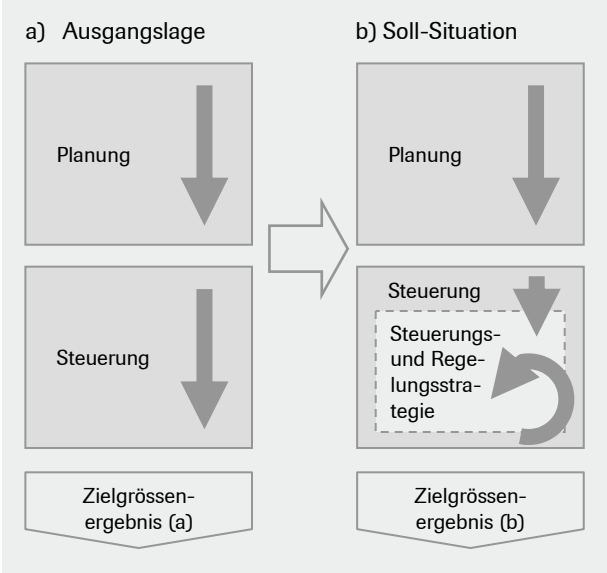


Abbildung 1: Einsatz und Wirkweise der Steuerungs- und Regelungsstrategie

1.4.2. Abgrenzung der Arbeit

Durch die Abgrenzung wird festgehalten, welche Voraussetzungen für den Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie zwingend erfüllt sein müssen (minimale Anforderungen).

Produktion:

Die vorliegende Arbeit richtet sich an Unternehmen aus dem sekundären Sektor (Rohstoffverarbeitung) [STA95], da grundsätzlich alle produzierenden Unternehmen, auch wenn nicht immer systemisch gelöst, die Funktionen der PPS ausüben.

Diskrete Fertigung:

Unternehmen aus dem Sekundärsektor können aufgrund der Ausrichtung der Produktstruktur entweder der Stückgutfertigung oder der Prozessfertigung zugeordnet werden [SCH07]. Diese Arbeit orientiert sich an den Charakteristiken und Eigenheiten der Diskreten Fertigung.

Steuerung – keine Planung:

Das Aachener PPS-Modell vermittelt u.a. einen inhaltlichen Überblick über das Gestaltungsobjekt PPS in Form verschiedener Referenzsichten. Die Aufgabenreferenzsicht in Abbildung 2 spezifiziert und detailliert die PPS-Aufgaben in einer allgemeingültigen, hierarchischen Abstraktion [SCH01]. In Abbildung 2 ist die Struktur des Aufgabenmodells auf der Ebene der Hauptaufgaben in Form von Kern- und Querschnittsaufgaben dargestellt. Die Kernaufgaben treiben die Abwicklung eines Auftrags voran während die Querschnittsaufgaben der bereichsübergreifenden Integration und Optimierung der PPS dienen [EVE02]. Die Datenverwaltung wird beiden Aufgabenarten zugerechnet. Wie im Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit in Abschnitt 1.4.1 bereits festgehalten be-

schränkt sich diese Arbeit auf die Steuerungsaufgaben im eigenen Fertigungsbereich. Das resultierende Aufgabengebiet ist in Abbildung 2 schraffiert dargestellt.

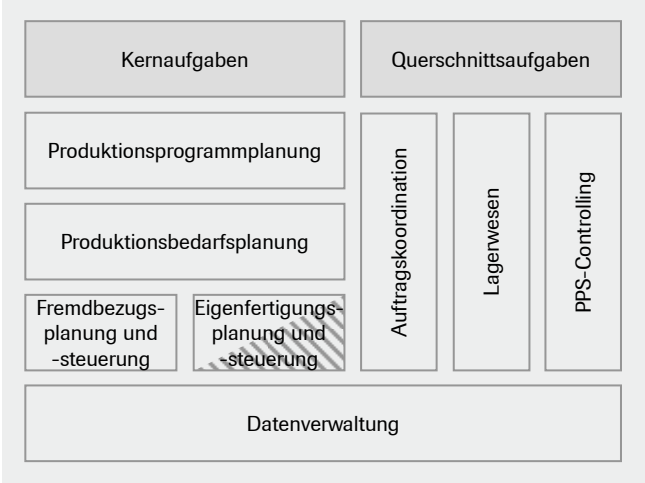


Abbildung 2: Aufgabenreferenzsicht nach dem Aachener PPS-Modell [SCH01]

Produktqualität:

Die Beherrschung der angewendeten Fertigungs-Technologien sowie die Erfüllung der geforderten Qualitätsmerkmale am Produkt werden im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt und somit nicht weiter behandelt.

1.4.3. Fokussierte Fertigungsstruktur

Das aus der Abgrenzung in Abschnitt 1.4.2 resultierende Einsatzgebiet für die zu entwickelnde Steuerungs- und Regelungsstrategie ist breit und kann die Massenfertigung ebenso wie auch die kundenspezifische Einzelfertigung umfassen. Aus diesem Grund wird zusätzlich zur Abgrenzung eine Fokussierung anhand der Fertigungsstruktur vorgenommen.

Die Fertigungsstruktur ist gekennzeichnet durch die Fertigungstiefe, die Typen- und Teilevielfalt, den Grad der Kundenauftragsorientierung und den Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsgrad [EID91]. Zur Verfolgung der produktionslogistischen Ziele bieten sich für einzelne Aspekte der Planung und Steuerung Alternativen an. Für die Klassifizierung der Strategien und Verfahren im Rahmen der PPS fasst Eversheim [EVE02] diese Charakteristiken der Fertigungsstruktur auf zwei Achsen zusammen: die Fertigungsart und das Fertigungsprinzip. Mit der Fertigungsart wird die zeitliche und mengenmässige Struktur des angebotenen Spektrums verstanden. Die zeitliche Struktur drückt sich in der Häufigkeit der Leistungswiederholung aus, die mengenmässige Struktur spiegelt den mengenmässigen Umfang einer Leistungsausführung wieder. Eine gängige Gliederung ist die Unterscheidung von Einzel-, Serien- und Grossserienfertigung (Massenfertigung). Das Fertigungsprinzip auf der anderen Seite hat sowohl auf die Anordnung der Betriebsmittel als auch auf die Organisationsstruktur einen entscheidenden Einfluss [EVE89]. Die drei wichtigsten Fertigungsprinzipien sind die Werkstättenfertigung, die Gruppenfertigung und die Fliessfertigung. Durch die Wahl des Fertigungsprinzips ergeben sich klare Anforderungen an das Fabriklayout bzw. den Maschinenstellplan, an die Organisationsstruktur, an die Auftragsabwicklung und somit auch an die Steuerung. In Abbildung 3 sind in der linken Bildhälfte existierende Strategien und Verfahren der PPS in einem solchen Raster aufgetragen. Die Lage des Eintrags legt fest, für welche Fertigungsstrukturen sich die Verwendung der entsprechenden PPS-Strategie eignet.

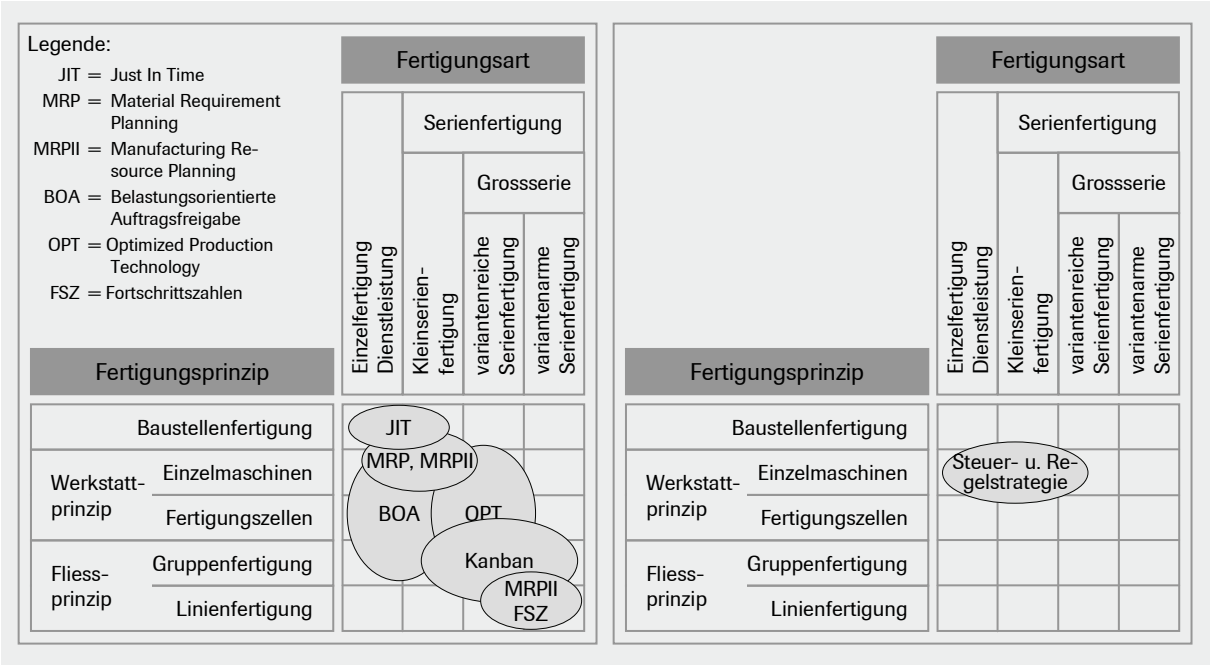


Abbildung 3: Strategien und Verfahren im Rahmen der PPS nach Eversheim [EVE02] (links) und fokussierte Fertigungsstruktur der vorliegenden Arbeit nach demselben Raster (rechts)

Das dynamische Umfeld, dem sich Fertigungsunternehmen stellen müssen, wurde in Abschnitt 1.1 beschrieben. Die Beherrschung von Fertigungskomplexität drängt sich für Schweizer Industrieunternehmen auf [FRI09]. Nur so sind der geforderte Variantenreichtum und wirtschaftliche Lagerbestände gleichzeitig realisierbar. Das bedeutet für den Fertigungsbereich den Umgang mit Klein- und Kleinstserien nach dem Einzelmaschinen-Prinzip (Werkstättenfertigung). Das resultierende Wirkfeld, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussiert werden soll, ist in Abbildung 3 in der rechten Bildhälfte dargestellt. Für diese Fertigungsstruktur eignet sich gemäss der linken Bildhälfte offensichtlich auch das verbreitete MRPII-Prinzip. Ein erster Überblick über die Funktionsweise des MRPII-Prinzips sowie die Nennung von Schwachstellen wurde einleitend bereits gegeben. Mit der Steuerungs- und Regelungsstrategie wird demzufolge nicht eine Lücke im Raster der Fertigungsstruktur erschlossen. Es wird beabsichtigt, die Auswirkungen bekannter Defizite der MRPII-Strategie auf die Zielgrössen durch ergänzende Funktionalitäten in der Steuerung zu verbessern. Das entspricht der Zielsetzung dieser Arbeit gemäss Abschnitt 1.4.1.

1.4.4. Typisches Anwendungsgebiet

Aufgrund der Zielsetzung, der Abgrenzung und der Fokussierung lässt sich das typische Anwendungsgebiet folgendermassen zusammen fassen: die vorliegende Arbeit stellt eine Methode zur Steuerung und Regelung der Fertigungsabläufe dar. Sie wirkt ergänzend zum Steuerungsteil und orientiert sich an den Planungsvorgaben. Die verfolgte Fertigungsstuktur zeichnet sich durch folgende, u.a. am Produktionsstandort Schweiz stark verbreitete, Charakteristiken aus:

- Fertigung von Kleinst-, Klein- und Mittelserien
- Geringe bis mittlere Wiederholhäufigkeit der Fertigungsaufträge
- Grosse Variantenvielfalt (breite Produktpalette)
- Losweiser Fluss, starke Variation der Anzahl Arbeitsgänge
- Komplexe Materialflüsse in einem Werkstatt-Prinzip
- Schwankungen in der Nachfrage

1.4.5. Aufbau und Gliederung der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Das folgende zweite Kapitel beginnt mit der Beschreibung der Aufgaben einer Fertigungssteuerung. Anschliessend werden grundlegende Definitionen vorgenommen und die bereits erwähnten produktionslogistischen Zielgrössen detailliert thematisiert. Der Zusammenhang der Zielgrössen wird schliesslich anhand einer möglichen Modellierung aufgezeigt.

Das dritte Kapitel beginnt mit der Differenzierung von Steuerung und Regelung. Mit einem Modell der Fertigungssteuerung wird eine Morphologie hergeleitet. Der folgende Überblick über bereits existierende PPS-Strategien und -Verfahren stellt die jeweilige Wirkweise vor und ordnet das Verfahren in die Morphologie ein. Die anschliessend geführte Diskussion fasst Gestaltungsgrundsätze zuammen, welche für die Entwicklung einer Strategie zur Steuerung und Regelung produktionstechnischer Systeme berücksichtigt werden müssen.

Im vierten Kapitel wird aufbauend auf dem zweiten und dritten Kapitel der Entwurf einer Fertigungssteuerung und –regelung vorgenommen. Dazu wird zuerst die grundlegende Idee erläutert. Es folgt eine Analyse der dezentralen Stellen einer Fertigung, in welcher die möglichen Aufgaben der Arbeitssysteme ermittelt werden. Nach der Vorstellung der Schlüsselelemente der Steuerungs- und Regelungsstrategie wird erörtert, wie die eben definierten Aufgaben umgesetzt werden. Zum Schluss wird systematisch geprüft, ob sämtliche Zustände berücksichtigt wurden. Das Kapitel schliesst mit einer Zusammenfassung.

Das fünfte Kapitel umfasst die Validierung des Entwurfs einer Fertigungssteuerung und -regelung. Dies erfolgt durch den Einsatz des Werkzeugs Simulationssoftware. Dazu folgt nach einer Einführung des Simulationswerkzeugs eine detaillierte Beschreibung des Modellkonzepts. Mit dem realisierten Simulationsmodell ist es möglich, den Fertigungsablauf diskreter Produktionseinheiten zu simulieren. Verwendet man reale Eingangsgrössen für das Simulationsmodell, so können die erzielten Ergebnisse mit den Resultaten aus der Realität verglichen werden. Auf dieser Basis wird die Steuerungs- und Regelungsstrategie im Rahmen von zwei Industrievergleichen getestet. Die beiden Unternehmen stammen aus unterschiedlichen Branchen.

Im sechsten Kapitel wird die Methode an der Aufgabenstellung aus dem ersten Kapitel gespiegelt um den Erfüllungsgrad der vorliegenden Arbeit zu ermitteln. Es werden mögliche Schwächen und Defizite des Verfahens formuliert. Im Rahmen einer Zusammenfassung wird die Effektivität des Verfahrens aufgeführt, die Differenzierung zu bereits existierenden Verfahren herausgestrichten und die Erfüllung der Gestaltungsgrundsätze geprüft, welche im dritten Kapitel formuliert wurden. Die Arbeit schliesst mit einem Ausblick.

2. Grundlagen der Fertigungssteuerung

2.1. Funktionale Gliederung der PPS

Die Aufgabe der Produktionsplanung und –steuerung (PPS) ist es, die Aufträge vollständig, d.h. mit der verlangten Stückzahl an Einzelteilen und zum vereinbarten Termin, fertigzustellen. Die Erfüllung dieser Aufgabe erfolgt mittels einer Planung des Produktionsablaufs sowie der entsprechenden Umsetzung dieser Planung durch die Steuerung. Die Teilung der funktionalen Landkarte der Produktionsplanung und –steuerung in Abbildung 4 in das Teilgebiet Planung und das Teilgebiet Steuerung ist demnach naheliegend. Hackstein [HAC89] definiert Funktionsgruppen für jedes Teilgebiet der PPS. Dieses Verständnis der PPS-Funktionen deckt sich mit dem Aachener PPS-Modell in Abbildung 2. Hackstein geht weiter und bricht die Hauptfunktionen in detaillierte Einzelfunktionen herunter (siehe Abbildung 4).

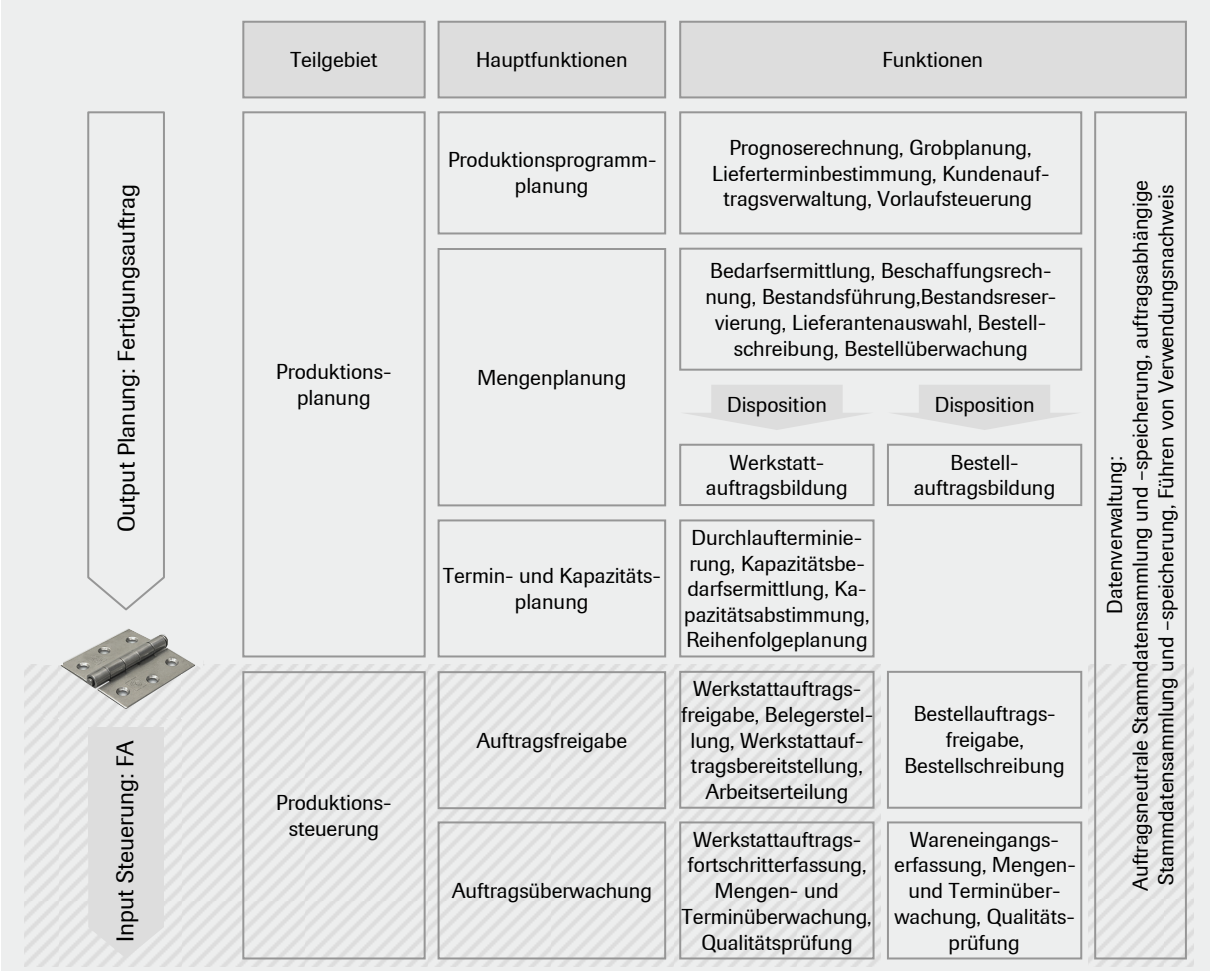


Abbildung 4: Funktionale Gliederung der Produktionsplanung und -steuerung (nach Hackstein) mit Abgrenzung dieser Arbeit (schraffiert) und dem Verständnis des Fertigungsauftrags als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung

2.1.1. Teilgebiet Produktionsplanung

Die Produktionsplanung plant den Produktionsablauf für eine bestimmte Zeit voraus. Die Produktionsplanung besteht aus den Funktionsgruppen Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung sowie Termin- und Kapazitätsplanung. Im Rahmen der Mengenplanung beginnt die Differenzierung zwischen Eigenfertigung und Fremdfertigung. Im ersten Fall folgt die Funktion der Bildung von Werkstattaufträgen resp. Fertigungsaufträgen. Im Fall der Fremdfertigung werden die ent-

sprechenden Informationen (Art, Menge und Bedarfszeitpunkt) an die Beschaffungsfunktion übergeben. Diese zeichnet sich im Weiteren zuständig für die Beschaffung der Teile und/oder Komponenten bei Lieferanten.

Das Teilgebiet Planung und die dazugehörenden Funktionsgruppen wurden bereits im Abschnitt 1.4.2 vom hier behandelten Forschungsgebiet abgegrenzt. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine weiterführende Detaillierung der Planungsfunktionen und es wird auf die zahlreiche, entsprechende Literatur verwiesen.

Allerdings relevant für das Verständnis dieser Arbeit, unabhängig von der Ausgestaltung der Planungsfunktion, ist, dass das Ergebnis der Produktionsplanung in Form von durchterminierten Fertigungsaufträgen dargestellt werden kann. Zu jedem Fertigungsauftrag ist der Endtermin bekannt. Hansemann [HAN06] betrachtet ebenfalls die Freigabe der Fertigungsaufträge als Verbindung zwischen den Teilgebieten Produktionsplanung und Produktionssteuerung [HAN06].

Reduziert man die Teilgebiete Planung und Steuerung gedanklich zu einfachen Input-/Output-Modellen, so produziert also die Planung für die eigene Fertigung Fertigungsaufträge. Der Output der Planung, die erzeugten Fertigungsaufträge, können beispielsweise in einer Auftragsliste geführt werden. Diese Fertigungsauftragsliste ist aus Sicht der Steuerung als Input zu verstehen. Entsprechend kann diese Auftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung aufgefasst werden. Dieses Verständnis ist in Abbildung 4 auf der linken Bildseite symbolisch dargestellt.

2.1.2. Teilgebiet Produktionssteuerung

Aufgabe der Produktionssteuerung ist es, die Planung trotz unvermeidlicher Änderungen und Störungen zu realisieren [WIE97]. Gemäss dem geschilderten Verständnisses einer Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (siehe Abschnitt 2.1.1) bedeutet das, die Fertigungsaufträge aus dieser Input-Liste umzusetzen. Dabei spielt es für die Steuerung keine Rolle, ob die Fertigungsaufträge aufgrund eines Prognoseverfahrens, aufgrund eines Verbrauchs (Lagerbewirtschaftung) oder aufgrund eines effektiven Kundenauftrags generiert und in die Auftragsliste eingetragen werden. Es kann sich ebenso um interne Projektaufträge im Falle eines Systemanbieters wie auch um interne Entwicklungsaufträge handeln, da beide – je nach Abgrenzung des Kundenverständnisses – als Kundenaufträge gehandhabt werden können.

Hackstein [HAC89] ordnet dafür dem Teilgebiet Steuerung die Funktionsgruppen Auftragsveranlassung und Auftragsüberwachung zu (siehe Abbildung 4):

Bei der Funktionsgruppe *Auftragsveranlassung* geht es um die kurzfristige Umsetzung des Fertigungsprogramms (Umsetzung der Auftragsliste). Hierzu sind Anpassungen der Planvorgaben wegen auftretender Abweichungen infolge von beispielsweise Störungen und Planungsungenauigkeiten notwendig. Die Funktionsgruppe umfasst die Einzelfunktionen Werkstattauftragsfreigabe, Arbeitsbelegerstellung, Verfügbarkeitsprüfung, Arbeitsverteilanweisung und Materialtransportsteuerung.

In der Funktionsgruppe *Auftragsüberwachung* sind die Zustandsänderungen der Aufträge und Kapazitäten zu erfassen und verwalten. Die Aufgaben der Funktionsgruppe werden durch die Einzelfunktionen Arbeitsfortschritterfassung, Wareneingangsmeldung, Kapazitäts- und Werkstattauftragsüberwachung sowie Kundenauftragsüberwachung und Kundenauftragsbezug erledigt.

Eversheim[EVE02] bringt zusätzlich den Einfluss der produktionslogistischen Zielgrössen ein (siehe Abschnitt 2.3). Somit legt die Steuerung unter Berücksichtigung der Vorgaben der Produkti-

onsplanung einerseits und der Zielgrössenvorgabe andererseits fest, wann welche Arbeitsvorgänge in welcher Reihenfolge einen Produktionsfaktor resp. eine Ressource beanspruchen.

2.2. Definitionen

2.2.1. Gliederung des Fertigungsauftrags

Für die Betrachtung und Diskussion eines Fertigungsauftrags eignet sich die Darstellung der darin enthaltenen Elemente entlang der Zeitachse. Die Arbeitsplatz- und Auftragsdurchlaufzeit sind die Grundelemente der Verfahren zur Fertigungsterminplanung und –steuerung [WIE97]. Dabei lassen sich grundsätzlich drei Betrachtungsebenen unterscheiden: die Fertigungsauftragsebene, die Arbeitsvorgangsebene sowie die Werkstückebene. Die Abbildung 5 zeigt einen Vorschlag, welcher auf Heinemeyer [HEI74] zurückgeht und wie er den Ausführungen der belastungsorientierten Fertigungssteuerung des Instituts für Fabrikanlagen (IFA, Universität Hannover) zugrunde liegt. In dieser Abbildung sind ebenfalls die drei Betrachtungsebenen ersichtlich.

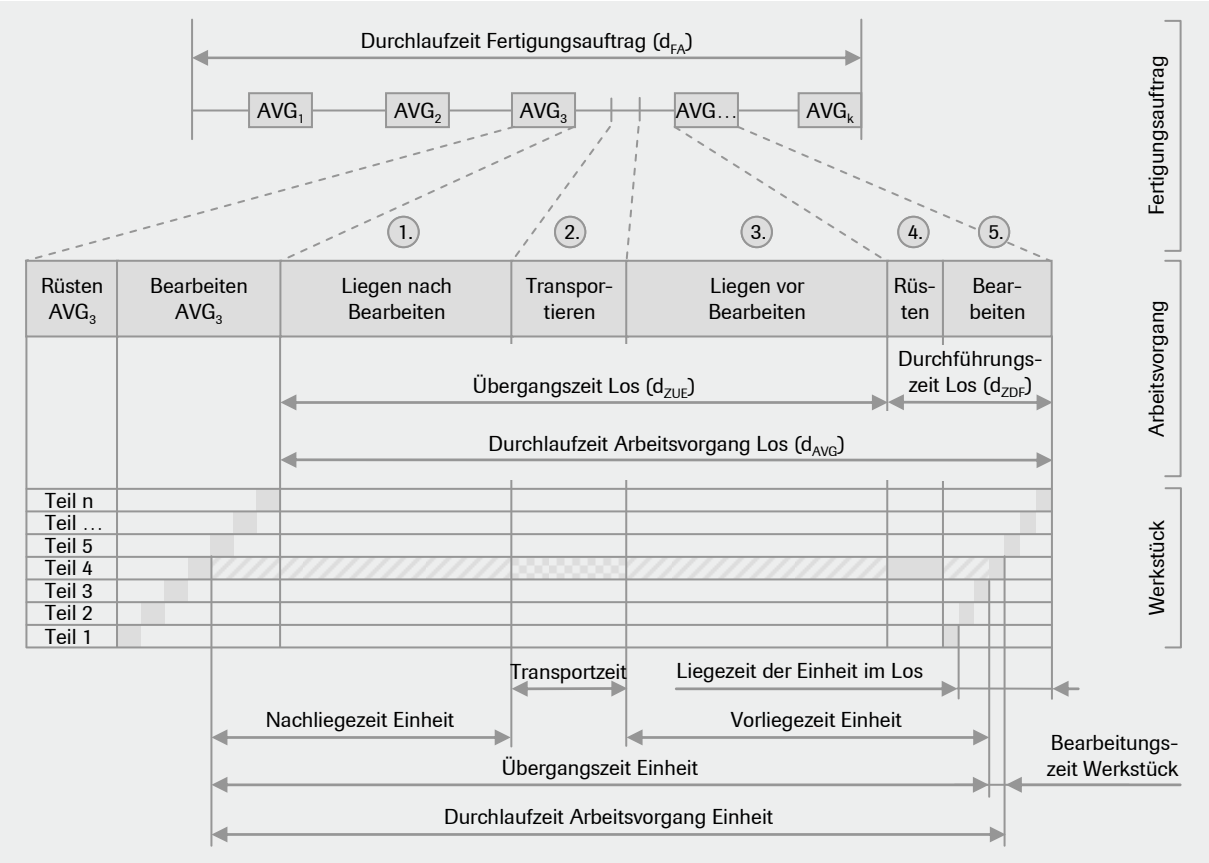


Abbildung 5: Arbeitsplatz- und Auftragsdurchlaufzeit nach Heinemeyer (IFA) auf verschiedene Betrachtungsebenen aufgeteilt [nach HEI74]

Auf der Ebene Fertigungsauftrag existieren einzelne Arbeitsvorgänge AVG_1 bis AVG_k. Jeder Arbeitsvorgang entspricht einem Operationsschritt gemäss Operationsplan. Aus der Perspektive eines Fertigungsauftrags kann auf der Ebene der Arbeitsvorgänge jeder Arbeitsvorgang in fünf weitere Bestandteile zerlegt werden (vgl. Abbildung 5):

1. Liegen nach Bearbeiten (nicht technisch)
2. Transportieren
3. Liegen vor Bearbeiten (nicht technisch)
4. Rüsten
5. Bearbeiten

Das Liegen nach Bearbeiten (1.) ergibt sich primär aus der Wartezeit auf den internen Transport zum nächsten Funktionsplatz. Nach durchgeführtem Transport (2.) folgt die Verweildauer in der Warteschlange des Funktionsplatzes (3.) bis zur Bearbeitung. Bei der Bearbeitung selber können die Zeitspannen Rüsten (4.) und Bearbeiten (5.) unterschieden werden. Bei dieser Gliederung wird davon ausgegangen, dass die Auftragspapiere physisch mit dem Fertigungsauftrag zusammen befördert werden. Das Rüsten ist somit erst dann möglich, wenn sich der Fertigungsauftrag in der Warteschlange des entsprechenden Funktionsplatzes befindet.

An einem Funktionsplatz wird ein Los stückweise hintereinander bearbeitet (siehe Abbildung 5 unten). Daraus resultiert für die einzelne Einheit auf der Werkstückebene eine zusätzliche Liegezeit, falls die Losgrösse grösser Eins beträgt. In einer Werkstattfertigung werden die einzelnen Lose als Ganzes transportiert und entsprechend gesteuert. Daher reicht für die weiteren Überlegungen die Betrachtung des ganzen Loses auf der Arbeitsvorgangsebene aus.

2.2.2. Gliederung des Arbeitsvorgangs

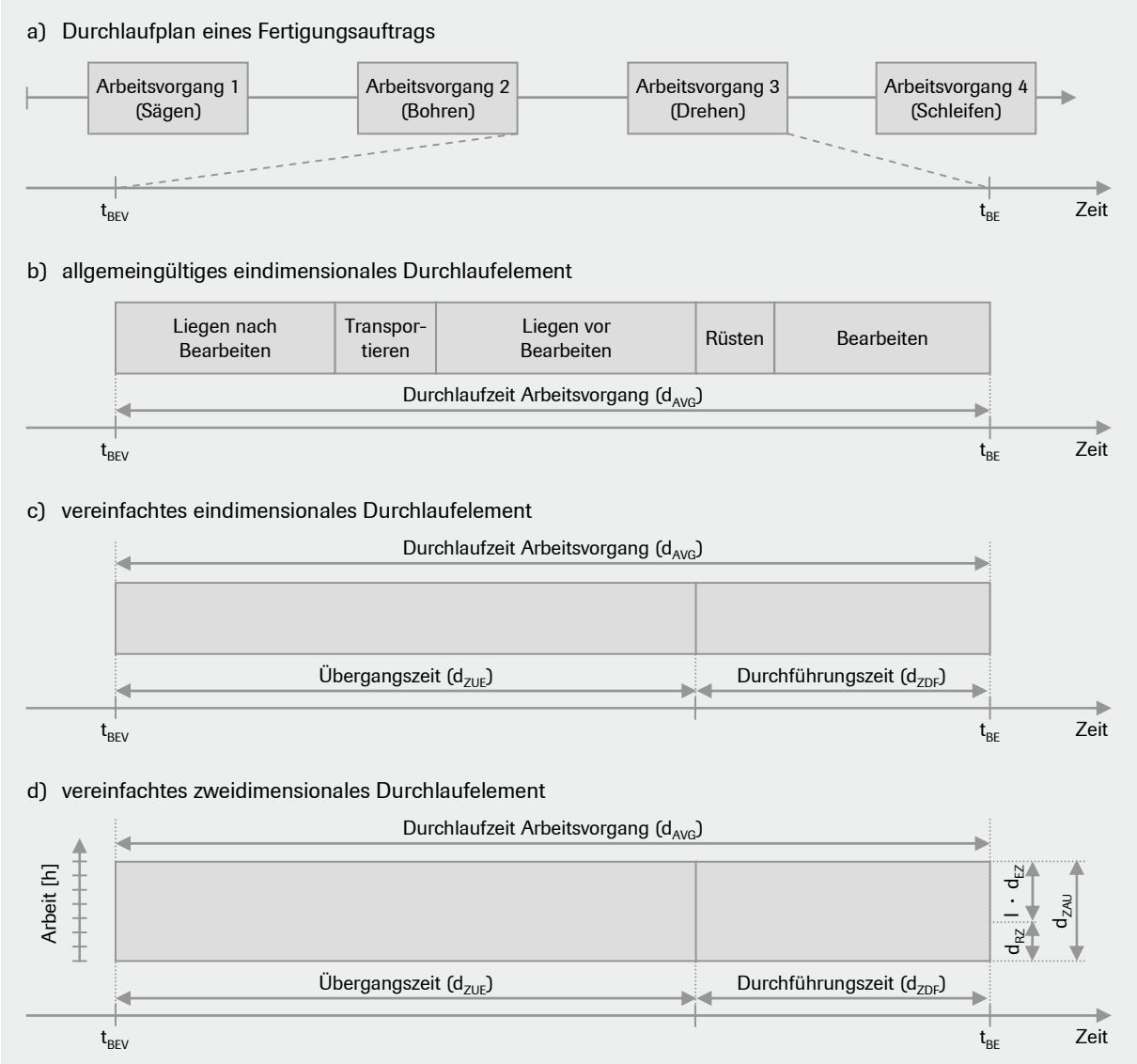


Abbildung 6: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente [NYH03]

Im Unterschied zu anderen Darstellungen (z.B. jener des Forschungsinstituts für Rationalisierung an der RWTH Aachen) grenzt das Fertigungsauftragdurchlaufplan-Modell im Teil a) der

Abbildung 6 die Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit anders ab. Primär aus Zeiterfassungsgründen beginnt die Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs mit dem Bearbeitungszeitende des vorhergehenden Arbeitsvorgangs. Für den ersten Arbeitsvorgang beginnt diese mit der Bereitstellung des Ausgangsmaterials respektive der Freigabe des Fertigungsauftrags.

Heinemeyer [HEI74] definiert die Durchlaufzeit durch ein Arbeitssystem (d_{AVG}) als *Durchlaufelement*. Fasst man das Rüsten und Bearbeiten zur Durchführungszeit (d_{ZDF}) und die übrigen Bestandteile des Arbeitsvorgangs zur Übergangszeit (d_{ZUE}) zusammen, so vereinfacht sich das Durchlaufelement zur Summe von Durchführungs- und Übergangszeit. Die Darstellungen des allgemeingültigen und des vereinfachten Durchlaufelements mit den entsprechenden Zeitpunkten auf der Zeitachse sind in Abbildung 6 in den Teilen b) und c) wiedergegeben.

Für die Berechnung der Durchlaufzeit des Durchlaufelements (und somit auch des Fertigungsauftrags) werden Wochenend- und Feiertage nicht berücksichtigt. Dadurch wird die betriebliche Leistung nicht durch eine beliebige Anzahl Wochenendtage oder regionale Festtage beeinträchtigt. Die Erfassung in Betriebskalendertagen (BKT) ermöglicht ausserdem auch den Vergleich zwischen Tochtergesellschaften in unterschiedlichen Ländern mit verschiedenen Feiertagsregelungen und unterschiedlichen Betriebsurlauben.

Das Durchlaufelement lässt sich aus den in der Betriebsdatenerfassung gesammelten Bearbeitungsenden der einzelnen Arbeitsvorgänge wie folgt ermitteln:

$$d_{AVG} = t_{BE} - t_{BEV} \tag{2.1}$$

mit d_{AVG} Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs [BKT]

t_{BE} Zeitpunkt Bearbeitungsende eines Arbeitsvorgangs [BKT]

t_{BEV} Zeitpunkt Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorgangs [BKT]

Handelt es sich um den ersten Arbeitsvorgang eines Fertigungsauftrags, so ist anstelle des Bearbeitungsendes des Vorgängers (t_{BEV}) der Zeitpunkt der Freigabe des Fertigungsauftrags zu verwenden. Handelt es sich um den letzten Arbeitsvorgang eines Fertigungsauftrags, so entspricht das Bearbeitungsende des Arbeitsvorgangs (t_{BE}) dem Ist-Endtermin des Fertigungsauftrags.

Die in Betriebskalendertagen gemessene Durchführungszeit d_{ZDF} hängt von der Kapazität des Arbeitssystems pro BKT ab, mit welcher die Vorgabezeit des Arbeitsvorgangs abgearbeitet wird. Da die effektiv benötigte Arbeitszeit aufgrund von beispielsweise Ausfallzeiten der Anlagen kaum mit der Vorgabezeit identisch sein wird, lässt sich dies über einen arbeitssystemspezifischen Zeitgrad korrigieren. Da allerdings die Durchführungszeit d_{ZDF} in der Regel klein gegenüber der Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs d_{AVG} ist, lässt sich dieser Zeitgrad auch vereinfachend gleich 1 setzen.

$$d_{ZDF} = \frac{d_{ZAU}}{K_{Tag} \cdot \zeta_i} \tag{2.2}$$

mit d_{ZDF} Durchführungszeit eines Arbeitsvorgangs [BKT]

d_{ZAU} Vorgabezeit für den Arbeitsvorgang [h]

K_{Tag} Tageskapazität [h / BKT]

ζ_i Zeitgrad (gebrauchte Stunden zu Vorgabestunden) des Arbeitssytems i [-]

Die eben verwendete Auftragszeit d_{ZAU} entspricht der Vorgabezeit, die für die Ausführung eines Arbeitsvorgangs an einem Arbeitssystem vorgesehen ist. Sie ergibt sich aus der Rüstzeit je Los, der Einzelzeit je Werkstück und der Losgrösse des Fertigungsauftrags:

$$d_{ZAU} = \frac{(l \cdot d_{EZ} + d_{RZ})}{60} \tag{2.3}$$

mit l Losgrösse des Fertigungsauftrags [Stk.]

d_{EZ} Einzelzeit (Vorgabezeit) pro Stück [min / Stk.]

d_{RZ} Rüstzeit (Vorgabezeit) pro Los [min / Los]

Mit der Berechnung der Durchführungszeit d_{ZDF} ist es möglich, die Übergangszeit d_{ZUE} zwischen zwei Arbeitsvorgängen in der Einheit BKT zu ermitteln:

$$d_{ZUE} = d_{AVG} - d_{ZDF} \tag{2.4}$$

mit d_{ZUE} Übergangszeit eines Arbeitsvorgangs [BKT]

Interessant für die Analyse eines Arbeitssystems sind nicht nur die Werte der einzelnen Arbeitsvorgänge, sondern insbesondere auch die Mittelwerte. Das arithmetische Mittel der Durchlaufzeiten verschiedener Arbeitsvorgänge an einem Arbeitssystem berechnet sich als:

$$\overline{d_{AVG}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{AVG\,i}}{n} \tag{2.5}$$

mit $\overline{d_{AVG}}$ Mittlere Durchlaufzeit der Arbeitsvorgänge [BKT]

$d_{AVG\,i}$ Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs i [BKT]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

Entsprechende Gleichungen lassen sich auch für die Mittelwerte der Übergangszeiten und Durchführungszeiten aufstellen. Die mittlere Durchlaufzeit sagt aus, wie lange ein Fertigungsauftrag respektive ein Los im Mittel an einem Arbeitssystem verweilt (Übergangs- und Durchführungszeit). Diese Durchlaufzeit d_{AVG} ist nicht direkt vom Arbeitsinhalt des einzelnen Arbeitsvorgangs abhängig. Für gewisse Fragestellungen ist es notwendig, auch die mittlere Durchlaufzeit für den in den Losen enthaltenen Arbeitsinhalt zu kennen. Dazu multipliziert man jede einzelne Durchlaufzeit d_{AVG} mit dem Arbeitsinhalt, also der Auftragszeit d_{ZAU}. Das Durchlaufelement erhält dadurch eine zweite Dimension und wird aus dem Grund nach Bechte [BEC84] als zweidimensionales Durchlaufelement bezeichnet (siehe Teil d) in Abbildung 6). Zur Mittelwertbildung wird die Summe der Durchlaufzeitflächen nicht durch die Anzahl Fertigungsaufträge, sondern durch die Anzahl der in diesen Fertigungsaufträgen enthaltenen Vorgabestunden dividiert:

$$\overline{d_{AVG\,gew}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{AVG\,i} \cdot d_{ZAU\,i})}{\sum_{i=1}^{n} d_{ZAU\,i}} \tag{2.6}$$

mit $\overline{d_{AVG\,gew}}$ Mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]

Grundsätzlich kann die gewichtete mittlere Durchlaufzeit kleiner, gleich oder grösser als die einfache mittlere Durchlaufzeit sein. Bei der gewichteten Betrachtung verschwindet der Auftragsbe-

zug und es ist deshalb möglich, verschiedene Arbeitssysteme und Fertigungsaufträge miteinander zu vergleichen (siehe auch Abschnitt 2.4.2).

Als ein relatives Mass für die Durchlaufzeit bietet sich der Flussgrad an. Er ist definiert als das Verhältnis der Durchlaufzeit zur Durchführungszeit eines Arbeitsvorgangs [NYH03] bzw. für die jeweiligen gemittelten Grössen gilt:

$$\overline{\Theta} = \frac{\overline{d_{AVG}}}{\overline{d_{ZDF}}} \tag{2.7}$$

mit $\overline{\Theta}$ Mittlerer Flussgrad [-]

$\overline{d_{ZDF}}$ Mittlere Durchführungszeit der Arbeitsvorgänge [BKT]

Der Flussgrad ist somit der Kehrwert des Durchführungszeitanteils [WIE97]. Analog (2.6) kann auch eine gewichtete, mittlere Durchführungszeit berechnet werden und somit der gewichtete mittlere Flussgrad. Aus der Definition (2.7) kann abgeleitet werden, dass für kleiner werdende Übergangszeiten der Grenzwert von $\overline{\Theta}$ (und auch von $\overline{\Theta_{gew}}$) 1 beträgt. Ein Flussgrad von 1 bedeutet, dass die Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs der Durchführungszeit entspricht:

$$\lim_{d_{ZUE} \to 0} \overline{\Theta} = \lim_{d_{ZUE} \to 0} \overline{\Theta_{gew}} = 1 \tag{2.8}$$

In diesem Fall, wenn die Übergangszeit gleich null ist, werden die Fertigungsaufträge ohne Liegezeiten und ohne Transportaufwand abgearbeitet. Allerdings ist der Flussgrad in den 90er-Jahren in vielen Unternehmen mit 10 anzusetzen [EID91, WIE97]. Dieser Umstand hat sich in vielen Unternehmen bis heute nicht wesentlich verbessert. Die Übergangszeit kann nach wie vor einen grossen Teil der gesamten Durchlaufzeit ausmachen [WES06]. Helfrich [HEL08] schätzt den Übergangszeitenanteil sogar auf 95% der Fertigungsdurchlaufzeit, was einem Faktor 20 entspricht.

Lödding [LÖD08] nennt im Rahmen der Produktionskennlinientheorie Plandurchlaufzeiten, die das drei- bis fünffache der mittleren Durchführungszeiten betragen sollten. In diesem Fall werden sowohl hohe Auslastungen der Funktionsplätze und gleichzeitig vertretbare Fertigungsdurchlaufzeiten erreicht. Der gewählte Zielwert des mittleren Flussgrades $\overline{\Theta}_Z$ lautet somit:

$$3 \leq \overline{\Theta}_Z \leq 5 \tag{2.9}$$

2.3. Zielgrössen der Produktionslogistik

In der Einleitung (Abschnitt 1) wurde bereits aufgeführt, dass die Wirtschaftlichkeit einer Fertigung den Unternehmenserfolg in starkem Masse mitbestimmt und auch den Standortentscheid für die Produktion beeinflussen kann. Diese Wirtschaftlichkeit wird durch die vier produktionslogistischen Zielgrössen gemäss Abbildung 7 festgelegt und operationalisiert [SCH04]. Sie können als Elementarfaktoren einer Fertigung verstanden werden und haben in diesem Sinne für jede Produktion Gültigkeit. Die Zielgrössen sind eine Funktion der Wirtschaftlichkeitsfaktoren und tragen in Form von Anlagekosten, Lager- und Umlaufbestandskosten, Kosten für die Kapitalbindung, Terminverzugskosten, Rüstkosten, etc. zum Ergebnis des Unternehmens bei.

Das Zielkreuz der Produktionslogistik in Abbildung 7 berücksichtigt die logistische Leistungsfähigkeit [SCH04] und bewertet somit die strategischen Vorteile, die sich für ein Unternehmen aus einer überlegenen Produktionslogistik ergeben [LÖD01]. In Käufermärkten werden Kundenansprüche durch zeitorientierte Strategien (time based management) befriedigt. Nach Wilbert [WIL09] sind aufgrund fehlerhafter Planung zu früh oder zu spät hergestellt Produkte eine Ver-

schwendung von Ressourcen. Die resultierenden Schwerpunkte sind niedrige Bestände, hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeiten [HEI02]. Eine hohe Termintreue in der Produktion gilt als Voraussetzung für eine gute Liefertreue. Bei einer Steigerung der Liefertreue von unter 70 % auf mehr als 90 % wurde eine mehr als 50 %-ige Erhöhung der Umsatzrendite erreicht [HOE07].

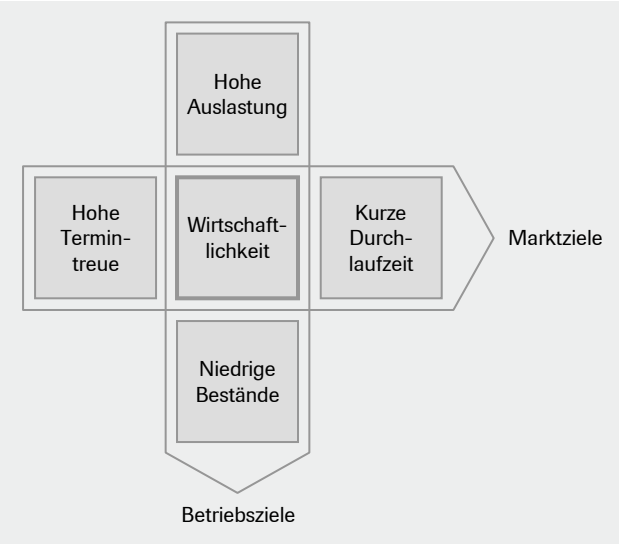


Abbildung 7: Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrössen

Die vier produktionslogistischen Zielgrössen in Abbildung 7 können in zwei Sichten unterteilt werden [WIE97]: marktseitig werden kurze Durchlaufzeiten und hohe Termintreue gefordert und wahrgenommen, unternehmensseitig werden eine hohe und gleichmässige Auslastung der Betriebsmittel sowie niedrige Bestände verfolgt.

2.3.1. Die Zielgrösse Bestand

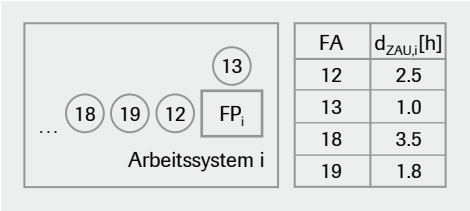
Der Umlaufbestand eines Fertigungsunternehmens setzt sich aus diversen Bestandsformen zusammen. Mögliche Bestandsformen sind Rohmaterial-, Komponenten-, Halbfertigerzeugnis- und Fertigwarenlager sowie Ware in Arbeit, die sich zwischen den definierten Lagerstufen befindet.

Aufgrund der Abgrenzung dieser Arbeit interessiert ausschliesslich die Ware in Arbeit. Dazu zählen auch Halbfertigerzeugnisse, sofern sie nicht Bestandteil einer beabsichtigten Lagerstufe sind. Die Ware in Arbeit setzt sich zusammen aus der Ware in Bearbeitung auf den Funktionsplätzen (FP) und den Fertigungsaufträgen in den Warteschlangen „vor“ den FP. Die Verfügbarkeit von Rohmaterial und Komponenten für die Freigabe der Fertigungsaufträge wird im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt. Die Planung generiert gemäss Abschnitt 2.1.1 eine Fertigungsauftragsliste mit Endterminen. Darum wird der Bestand im Fertigwarenlager als ein Ergebnis der Planung aufgefasst und stellt hier keinen Optimierungsgegenstand dar.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht interessiert insbesondere das durch Bestände gebundene Kapital [CHF]. Dazu muss der Umlaufbestand als Summe von Materialpreis und Wertschöpfung über der Zeit berechnet werden. Das bedeutete einerseits die permanente Pflege und Verarbeitung grosser (variabler) Stammdatenmengen. Andererseits ist durch diese Vorgehensweise der direkte Bezug zur Leistung der Funktionsplätze nicht möglich. Die Leistung während einem bestimmten Betrachtungszeitraum wird in der Regel entweder in Stück oder, inbesondere bei artikelspezifischen Einzelzeiten, durch die Summe der resultierenden Vorgabezeiten beurteilt. Falls man die Ware in Arbeit in Vorgabestunden [h] misst, so entspricht der resultierende Wert dem offenen Ar-

beitsvorrat der Arbeitssysteme. Dadurch wird ein direkter Bezug sowohl zur Zielgrösse Leistung der Arbeitssysteme als auch zur Zielgrösse Durchlaufzeit der Arbeitsvorgänge (und somit auch der Fertigungsaufträge) ermöglicht (siehe Abschnitte 2.4 und 2.5).

Die finanzielle Ermittlung des Bestands eignet sich zur Bewertung des gesamten Umlaufbestands zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Steuerung der Ablauforganisation orientiert sich am Bestand in Form von Ware in Arbeit. Durch den direkten Bezug zu den Zielgrössen ist die Messung der Ware in Arbeit in Vorgabestunden zweckmässiger. Für diese Arbeit wird im Weiteren unter Bestand der offene Arbeitsvorrat der Arbeitssysteme in Vorgabestunden [h] verstanden. Weitere Messgrössen könnten, jeweils in Anlehnung an die Einheit, in welcher die Ressourcenleistung ausgedrückt wird, die Erfassung der Anzahl Fertigungsaufträge [Anzahl] und insbesondere in der Prozessindustrie auch Einheiten wie Gewicht [kg oder t], Länge [m] und Volumen [m^3] sein.



FA	$d_{ZAU,i}$[h]
12	2.5
13	1.0
18	3.5
19	1.8

Abbildung 8: Situation am Arbeitssystem i (links) mit möglichen Vorgabezeiten der Fertigungsaufträge für den FP_i (rechts)

Die Abbildung 8 zeigt in der linken Bildhälfte ein beliebiges Arbeitssystem i (AS_i) bestehend aus dem Funktionsplatz i und der dazugehörenden Warteschlange. Die darin ersichtlichen Kreise symbolisieren einzelne Fertigungsaufträge (FA), die im nächsten Operationsschritt durch den Funktionsplatz i bearbeitet werden müssen. Demnach befindet sich der Fertigungsauftrag Nr. 13 gegenwärtig in Bearbeitung, die Fertigungsaufträge 12, 18 und 19 bilden die Warteschlange des Arbeitssystems i. In der rechten Bildhälfte der Abbildung 8 sind die Auftragszeiten der Fertigungsaufträge für den Funktionsplatz i beispielhaft aufgeführt. Somit berechnet sich der Bestand des Arbeitssystems i zu einem beliebigen Zeitpunkt t als:

$$B_i(t) = \sum_{k=1}^{n} d_{ZAU(AS\ i\ t)} \tag{2.10}$$

mit $B_i(t)$ Bestand des AS_i zum Zeitpunkt t [h]

$d_{ZAU(AS\ i\ t)}$ Vorgabezeit der FA, die sich zum Zeitpunkt t im AS_i befinden [h]

n Anzahl freigegebene FA im produktionstechnischen System [-]

Gemäss (2.10) beträgt der Bestand des in Abbildung 8 dargestellten Arbeitssystems zum gegenwärtigen Zeitpunkt 8.8 h (= 2.5 h + 1.0 h + 3.5 h + 1.8 h). Zu beachten ist, dass die Vorgabezeit des Fertigungsauftrags Nr. 13 vollumfänglich zum Bestandswert des Arbeitssystems dazuaddiert wird, unabhängig von der bereits geleisteten Abarbeit der entsprechenden Vorgabezeit. Das entspricht den Ausführungen zur Gliederung des Arbeitsvorgangs (siehe Abschnitt 2.2.2), nach welchen die Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs gemäss (2.1) bis zum Bearbeitungsende dauert. Entsprechend zählt auch die Auftragszeit zum Bestand des betrachteten Arbeitssystems.

Mit Zuhilfenahme von (2.10) lässt sich der Bestand der gesamten Fertigung, bestehend aus m Arbeitssystemen, als Summe der Bestände der einzelnen Arbeitssysteme berechnen:

$$B(t) = \sum_{i=1}^{m} B_i(t) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} d_{ZAU(AS\ i\ t)} \tag{2.11}$$

mit $B(t)$ Bestand der Fertigung zum Zeitpunkt t [h]

m Anzahl Arbeitssysteme in der Fertigung [-]

n Anzahl freigegebene FA im produktionstechnischen System [-]

Ein Fertigungsauftrag, der sich in der Auftragsliste befindet, jedoch noch nicht ausgelöst wurde, zählt demnach nicht zum Bestand.

2.3.2. Die Zielgrösse Durchlaufzeit

Es gilt die Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags d_{FA} von jener der Durchlaufelemente d_{AVG} zu unterscheiden. Die Gliederung eines Fertigungsauftrags sowie die Berechnung der Durchlaufelemente wurde in Abschnitt 2.2 behandelt. Die Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrags d_{FA} lässt sich als Differenz aus Fertigstellung und Freigabe des Auftrags (2.12) oder als Summe der Durchlaufelemente gemäss Abschnitt 2.2.2 berechnen (2.13) [WIE97]:

$$d_{FA} = t_{AFS} - t_{AFG} \tag{2.12}$$

mit d_{FA} Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrags [BKT]

t_{AFS} Zeitpunkt Auftragsfertigstellung [BKT]

t_{AFG} Zeitpunkt Auftragsfreigabe [BKT]

$$d_{FA} = \sum_{i=1}^{n} d_{AVG\ i} \tag{2.13}$$

mit n Anzahl Arbeitsvorgänge des Fertigungsauftrags [-]

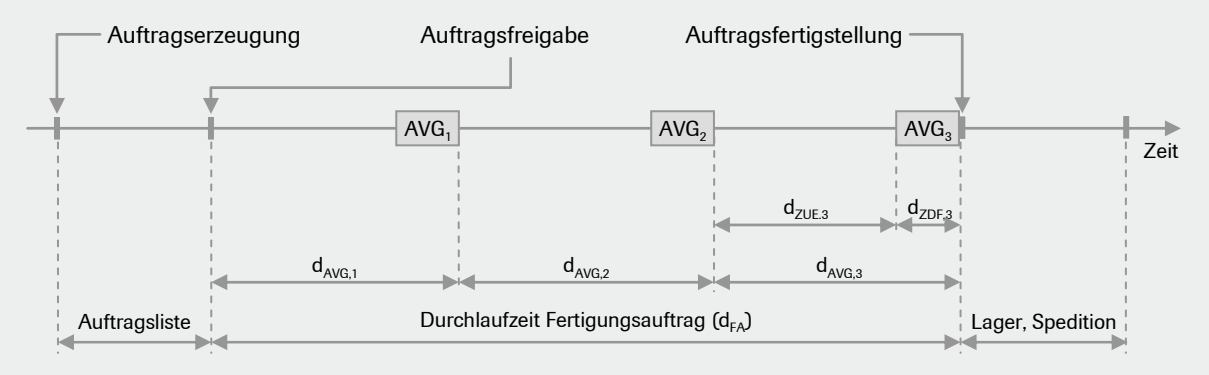


Abbildung 9: Zusammenhang von Auftragsdurchlaufzeit d_{FA} und Durchlaufelement d_{AVG} am Beispiel eines Fertigungsauftrags mit drei Arbeitsvorgängen

Für den Mittelwert $\overline{d_{FA}}$ der Auftragsdurchlaufzeit von k Aufträgen gilt:

$$\overline{d_{FA}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} d_{FA\ i}}{k} = \frac{\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n(i)} d_{AVG\ i\ j}}{k} \tag{2.14}$$

mit $d_{AVG\ i\ j}$ Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs j des FA i [BKT]

$n(i)$ Anzahl Arbeitsvorgänge des i-ten FA [-]

k Anzahl Fertigungsaufträge [-]

Mit diesen Formeln ist es möglich, das Durchlaufverhalten von Fertigungsaufträgen und das Verhalten der Arbeitssysteme basierend auf einem gemeinsamen Element, dem Durchlaufelement, zu beschreiben. Der in (2.12) bis (2.14) definierte Sachverhalt ist in der Abbildung 9 am Beispiel eines Fertigungsauftrags bestehend aus drei Arbeitsvorgängen dargestellt.

Die Dauer zwischen Erzeugung und Freigabe des Fertigungsauftrags zählt nicht zur Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags. Der Fertigungsauftrag ist dabei in der Auftragsliste eingetragen, aus Sicht der Fertigung informatorisch vorhanden jedoch nicht physisch existent. Das zugehörige Rohmaterial und die Komponenten stellen entsprechend auch keinen Bestandteil der Ware in Arbeit dar.

Die Freigabe des Fertigungsauftrags entspricht dem Startzeitpunkt des ersten Durchlaufelements. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich der Fertigungsauftrag – respektive das Rohmaterial und die Komponenten - physisch in der Warteschlange des ersten Arbeitssystems. Die Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags entspricht der Summe der zum Auftrag gehörenden Durchlaufelemente.

Die Beendigung des letzten Arbeitsvorgangs stellt das Ende der Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags dar. Mit der Fertigstellung des Fertigungsauftrags ist auch der Durchlauf durch die Fertigung beendet. Nachgelagerte Aktivitäten wie Verpackung, Lagerung etc. zählen nicht zur Fertigungsauftragsdurchlaufzeit. Dies liesse sich durch eine Anpassung der Bereichsabgrenzung und einer gleichzeitigen Modellierung dieser Tätigkeiten in Form von Arbeitssystemen ermöglichen.

2.3.3. Die Zielgrösse Auslastung

Für die Berechnung der Auslastung eines Arbeitssystems ist vorgängig die Ermittlung der Leistung notwendig. Die mittlere Leistung wird als Arbeit pro Zeiteinheit verstanden. Bezogen auf einen Betrachtungszeitraum P gilt somit für die mittlere Leistung $\overline{L}$ in Stunden pro BKT:

$$\overline{L} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{ZAU\,i}}{P} \tag{2.15}$$

mit n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

P Länge des Betrachtungszeitraum [BKT]

Es gilt die Voraussetzung, dass pro Arbeitsvorgang nur eine Rückmeldung erfolgt [NYH03]. Zu berücksichtigen ist, dass bei kurzen Betrachtungszeiträumen eine Abbildungsunschärfe entstehen kann. Die mittlere Leistung wird eventuell durch einen Auftrag in Bearbeitung insofern beeinflusst, dass er am Ende des Betrachtungszeitraums angebotene Kapazität bezogen hat, jedoch erst in der Folgeperiode abgemeldet wird. Gleichzeitig kann es auch sein, dass ein Arbeitsvorgang direkt zu Beginn eines Betrachtungszeitraums zurückgemeldet wird, die Bearbeitung aber hauptsächlich mit Kapazität aus dem vorangehenden Betrachtungszeitraum durchgeführt wurde.

Die Auslastung eines Arbeitssystems ist der prozentuale Anteil von effektiv geleisteter Arbeit im Verhältnis zur angebotenen Kapazität [NYH03]. Die Auslastung bezieht sich demnach auf einen Betrachtungszeitraum und nicht auf einen -zeitpunkt.

$$\overline{\Gamma} = \frac{\overline{L}}{K_{\max}} \cdot 100 \tag{2.16}$$

mit $\overline{\Gamma}$ Mittlere Auslastung des AS [%]

$\overline{L}$ Mittlere Leistung des AS [h / BKT]

$K_{\max}$ Maximal mögliche Kapazität des AS [h / BKT]

Bei dieser Betrachtung wird vorausgesetzt, dass die tatsächlich anfallenden Arbeitsstunden den Vorgabezeiten entsprechen [WIE97], da die Leistung nach (2.15) in Vorgabestunden ausgedrückt wird. Geringe und punktuelle Abweichungen können im Rahmen der Mittelwertrechnung vernachlässigt werden. Andernfalls wird die mittlere Auslastung negativ beeinflusst oder kann auch über 100 % betragen.

Die in (2.16) verwendete maximal mögliche Kapazität entspricht der angebotenen Kapazität während dem Betrachtungszeitraum. Diese wird nach oben durch den restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel oder Personal) bestimmt [NYH03]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die maximal mögliche Einsatzzeit eines Betriebsmittels durch kapazitätsmindernde Störungen (sachliche Verteilzeit) verringert wird und somit eine geringere Verfügbarkeit ausweist. Auch die Personalkapazität wird durch verschiedene Grössen beeinflusst (persönliche Verteilzeit) und ist in der Regel geringer als die persönliche Arbeitszeit.

2.3.4. Die Zielgrösse Termintreue

Die Termintreue ist ein Mass zur Beurteilung der Gesamtheit aller Fertigungsaufträge oder Arbeitsvorgänge innerhalb eines bestimmten Zeitraums [LÖD08]. Vorgängig ist die Ermittlung der Terminabweichungen der einzelnen Fertigungsaufträge oder Arbeitsvorgänge im betrachteten Bezugszeitraum notwendig.

Grundsätzlich kann sowohl für den Zugang als auch für den Abgang die Zielgrösse Termintreue berechnet werden. Dies gilt sowohl auf Stufe Fertigungsauftrag (Fertigung) als auch auf Stufe Arbeitsvorgang (Arbeitssystem). Im Folgenden wird mit dem Begriff Termintreue jeweils der Abgang, also die Fertigstellung, auf Stufe Fertigungsauftrag verstanden. Gleiches gilt für die Terminabweichung. Die Berechnung der Termintreue im Zugang wie auch auf Stufe Arbeitsvorgang kann analog zu den folgenden Ausführungen durchgeführt werden.

Um die Terminabeichung ermitteln zu können, ist es notwendig, neben dem effektiven Fertigstelltermin auch den geplanten Endtermin datentechnisch verfügbar zu machen. Die Ermittlung der Terminabweichung auf Ebene Fertigungsauftrag ist in der Regel problemlos, da jeder Fertigungsauftrag sowohl einen Ist- als auch einen Plan-Endtermin mit sich führt. Die Berechnugn der Terminabweichung eines Arbeitsvorgangs setzt voraus, dass die Termin- und Kapazitätsplanung durchgeführt wurde und die resultierenden Endtermine der Arbeitsvorgänge verfügbar sind.

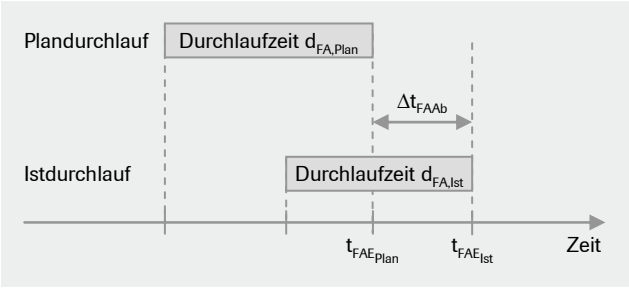


Abbildung 10: Definition der Terminabweichung im Abgang eines Fertigungsauftrags [DOM88]

Die Terminabweichung (im Abgang eines Fertigungsauftrags) drückt aus, um welche Zeitdauer ein Fertigungsauftrag gegenüber dem geplanten Fertigstelltermin verspätet fertig gestellt wird [DOM88]. Sie wird für einen einzelnen Fertigungsauftrag folgendermassen ermittelt:

$$\Delta t_{FAAb} = t_{FAE\ Ist} - t_{FAE\ Plan} \tag{2.17}$$

mit Δt_{FAAb} Terminabweichung im Abgang eines FA [BKT]

$t_{FAE\ Ist}$ Ist-Bearbeitungsende eines FA [BKT]

$t_{FAE\ Plan}$ Plan-Bearbeitungsende eines FA [BKT]

Ist die Terminabweichung Δt_{FAAb} positiv, so ist der Fertigungsauftrag später als geplant zurück gemeldet worden. Im Falle eines negativen Werts liegt eine zu frühe Fertigstellung vor [NYH03]. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 10 am Beispiel eines Fertigungsauftrags wiedergegeben.

Nach der Berechnung der Terminabweichungen kann die Termintreue T ermittelt werden. Sie ist definiert als prozentualer Anteil der innerhalb einer gegebenen Termintoleranz fertig gestellten Fertigungsaufträge während eines Betrachtungszeitraums [YU01]:

$$T = \frac{n_{1\ FA}}{n_{2\ FA}} \cdot 100 \tag{2.18}$$

mit T Termintreue [%]

$n_{1\ FA}$ Anzahl FA mit $\Delta t_{FAAbUG} \leq \Delta t_{FAAb} \leq \Delta t_{FAAbOG}$ [-]

$n_{2\ FA}$ Gesamte Anzahl FA im Betrachtungszeitraum [-]

Δt_{FAAbUG} Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

Δt_{FAAbOG} Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

Falls beispielsweise mit der Termintreue während einem Betrachtungszeitraum der Anteil der Fertigungsaufträge mit taggenauer Fertigstellung ermittelt werden soll, so sind sowohl die Untergrenze wie auch die Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung gleich Null zu setzen.

Man kann die Termintreue als logistische Prozesssicherheit deuten [WIE03]. Als logistische Prozessfähigkeit bezeichnet Wiendahl die Einhaltung der Wunschliefertreue. Die Wunschliefertreue ist eine Messgrösse, die einen direkten Bezug zum Absatzmarkt hat. Sie bezeichnet den Anteil der Aufträge, für die das Unternehmen den vom Kunden gewünschten Liefertermin zusagt und einhält. Aufgrund der Abgrenzung dieser Arbeit wird die Wunschliefertreue im Folgenden nicht ausgewertet. Der Betrachtungsgegenstand der Arbeit ist die Fertigungssteuerung. Sie hat die Aufgabe, die Fertigungsauftragsliste der Planung umzusetzen (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Fertigungsaufträge in dieser Liste verfügen über einen Sollendtermin. Die Ermittlungsweise dieses Sollendtermins ist der Steuerung unbekannt. Es kann sich also sowohl um Fertigungsaufträge aus einem Prognoseverfahren, um Verbrauchsaufträge, um Kundenaufträge oder beliebige Kombinationen davon handeln. Das ist abhängig vom eingesetzten Planungsverfahren sowie dessen Parametrierung. Diese Argumente sollen für das Ergänzungsmodul der Fertigungssteuerung irrelevant sein.

Es darf jedoch angenommen werden, dass eine Verbesserung der Termintreue auch positive Auswirkungen auf die Wunschliefertreue haben wird.

2.3.5. Das Polylemma des Zielkreuzes

Gemäss Bichler [BIC95] sind die vier Zielgrössen in Abbildung 7 naturgemäss in höchstem Masse konfliktär und können nicht gleichzeitig und unabhängig voneinander optimiert werden. Dieser Umstand wird in der Literatur als Dilemma und teilweise gar Polylemma der Fertigungsplanung genannt [HEI02]. Beispielsweise wird sich mit sinkendem Bestand auch die Durchlaufzeit der Fer-

tigungsaufträge verringern, die Auslastung aber ebenfalls. Mit einer zunehmenden Auslastung sinken zwar die Stillstandskosten, dafür aber nehmen die Bestände zu. Nach Wiendahl [WIE97] nehmen mit einem wachsenden Bestandsniveau Mittelwert und Streuung der Durchlaufzeit zu. Dadurch wird die Vorhersage der Durchlaufzeit eines einzelnen Fertigungsauftrags immer unsicherer. Eine unsichere Vorhersage der Durchlaufzeit wirkt sich tendentiell negativ auf die Termintreue des Fertigungsauftrags aus. In der Regel steigt dadurch die Anzahl der Eilaufträge und die Notwendigkeit von Terminjägern nimmt zu. Üblicherweise erfolgen Aktionen von Terminjägern auf Kosten von aktuell nicht dringenden oder weniger dringenden Fertigungsaufträgen, was schlussendlich wiederum den Mittelwert und die Streuung dieser Durchlaufzeiten negativ beeinflusst.

Erschwert wird das geschilderte Polylemma der Fertigungsplanung durch die Tatsache, dass die Abhängigkeiten der vier Zielgrössen untereinander im Allgemeinen nicht explizit bekannt sind. Dazu kommt, dass sich die Zielgrössen nicht direkt miteinander vergleichen lassen. Zwar lassen sich Bestand und Auslastung monetär darstellen, die Grössen Durchlaufzeit und Termintreue sind einer solchen Betrachtung nur indirekt zugänglich.

Wiendahl [WIE97] stellt die Vermutung auf, dass es ein Gesamtoptimum womöglich gar nicht gibt. Diese Vermutung ist insbesondere für den Fall nachvollziehbar, in welchem man das Polylemma auf qualitative Art und Weise lösen will. In dem Fall wird das vermeintliche Optimum (im Sinne eines optimalen Betriebspunkts der Fertigung) wahrscheinlich immer wieder zu Durchlaufzeiten führen, die vom Markt nicht akzeptiert werden oder die aus Kundensicht geforderte Termintreue hat unter Umständen eine nicht vertretbare niedrige Auslastung des Maschinenparks zur Folge.

Ein erheblicher Fortschritt ist es, wenn die vier Zielgrössen in ihrer Abhängigkeit untereinander quantifiziert werden können. Dies stellt eine Voraussetzung dar, damit Unternehmen je nach Betriebs- und Marktsituation unterschiedliche Produktionsstrategien verfolgen können. Der optimale Betriebspunkt der Fertigung ist somit nicht statisch. Er ist das Ergebnis einer Zielfunktion, welche die äusseren Einflussgrössen berücksichtigt und mit den innerbetrieblichen Vorgaben vereint.

2.3.6. Der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung

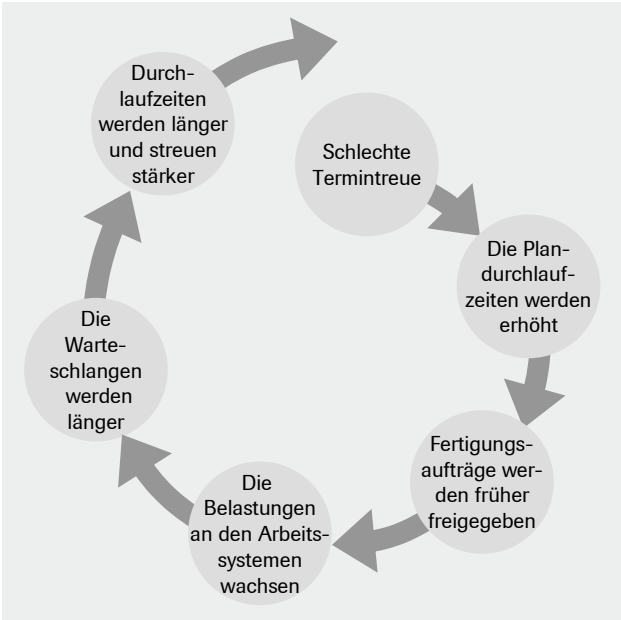


Abbildung 11: Der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung, der durch Verlängerung der geplanten Durchlaufzeiten entsteht [nach WIE97]

Die industrielle Realität ist oftmals geprägt durch eine schlechte Termintreue der Fertigungsaufträge respektive von grossen Terminabweichungen in der Fertigung. Aus der Unkenntnis der tatsächlichen Zusammenhänge zwischen den Zielgrössen entspringt nach Wiendahl [WIE97] daraus der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung (siehe Abbildung 11). Er beginnt damit, dass von der schlechten Termineinhaltung auf zu kurze Plandurchlaufzeiten geschlossen wird.

In der Folge werden die planerischen Durchlaufzeiten erhöht. Als Ergebnis der Durchlaufzeitterminierung, welche mit diesen Plandurchlaufzeiten rechnet, werden die Fertigungsaufträge früher als bisher freigegeben. Dadurch steigen die Bestände an den Arbeitssystemen, da die Warteschlangen grösser werden. Dies bedeutet für die Fertigungsaufträge eine längere, mittlere Liegezeit und daraus resultierend längere Durchlaufzeiten, verbunden mit einer grösseren Streuung.

Im Ergebnis ist die Termintreue schlechter statt besser geworden. Die Anzahl der Eilaufträge und Sonderaktionen nimmt tendentiell zu, da sich entsprechend auch mehr Fertigungsaufträge im freigegebenen Status befinden. Nach Wiendahl [WIE97] wird der Fehlerkreis zu einer Fehlerspirale. Schönsleben [SCH07] stellt denselben Sachverhalt als Teufelskreis dar. Er nennt als Anstoss den Anstieg der Anzahl Kundenaufträge. Der Effekt, dass die Anzahl der freigegebenen Fertigungsaufträge ansteigt, ist derselbe. Es folgt der Entscheid zur Verlängerung der Plandurchlaufzeiten und der weitere Verlauf des Teufelskreises deckt sich mit den Erläuterungen zum Fehlerkreis.

Aus diesem Sachverhalt wird klar, dass in der Praxis nicht nur der Kenntnisstand über den Zusammenhang der Zielgrössen mangelhaft ist. Es kommt ebenfalls zum Ausdruck, dass durchgeplante Fertigungssysteme instabil auf eine variable Anzahl Fertigungsaufträge – also eine sich ändernde Auftragslast – reagieren können. Letzteres trifft nicht zu, falls die Planung mit unendlichen Kapazitäten rechnet oder direkt einen Kapazitätsabgleich vornimmt. Sowohl die Qualität als auch die Aktualität eines solchen Abgleichs ist fraglich (siehe Abschnitt 1).

2.4. Modellierung der logistischen Zielgrössen

Um den Fehlerkreis der Fertigungssteuerung aufzubrechen und das Polylemma der Ablaufplanung durch eine aktive Prozess- und Produktionsgestaltung beherrschbar zu machen ist es erforderlich, die wechselseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrössen sowie deren Beeinflussungsmöglichkeiten sowohl qualitativ erklären als auch quantitativ beschreiben zu können [NYH03]. Dem Anspruch wird in diesem Abschnitt in Form einer Modellierung der produktionslogistischen Zielgrössen Folge geleistet.

2.4.1. Little's Law

Das Gesetz von Little stammt aus der Warteschlangentheorie. Es besagt, dass die durchschnittliche Anzahl Kunden in einem Warteschlangenmodell, welches sich in einem stabilen Zustand befindet, gleich dem Produkt ihrer durchschnittlichen Ankunftsrate und ihrer durchschnittlichen Verweildauer ist:

$$\overline{N} = \lambda \cdot \overline{F} \tag{2.19}$$

mit $\overline{N}$ Durchschnittliche Anzahl Kunden im System [Anz.]

λ Durchschnittliche Ankunftsrate der Kunden [Anz. / h]

$\overline{F}$ Durchschnittliche Verweildauer der Kunden im System [h]

Der Mathematiker John D. C. Little formulierte und veröffentlichte 1961 den formalen Beweis dazu. Nicht nur aufgrund der Einfachheit und intuitiven Zugänglichkeit war das Ergebnis allerdings

bereits bekannt und die Möglichkeit von früheren Beweisen ist nicht auszuschliessen [CON67]. Trotzdem handelt es sich dabei um ein beachtliches Ergebnis. Es impliziert nämlich, dass das Durchlauf- und Bestandsverhalten in einer Warteschlange vollkommen unabhängig von der benutzten Wahrscheinlichkeitsverteilung ist. Mit diesem Beweis müssen keine Annahmen über die Verteilung der Ankunftszeiten oder die Warteschlangendisziplin getroffen werden. Die Beziehung (2.19) lässt sich nach Hopp [HOP08b] auf eine ganze Fabrik, eine Abteilung, ein Lager oder auch auf einzelne Maschinen anwenden. Voraussetzung ist, dass Bestand, Durchsatz und Durchlaufzeit in konsistenten Einheiten gemessen werden. Das Gesetz gilt somit für das ganze Auftragsspektrum eines Fertigungsunternehmens, für ein Produktbereich oder für ein einzelnes Produkt.

Der Einsatzbereich der Formel ist breit, daher wird die Nomenklatur in der Literatur offen gehalten. Setzt man voraus, dass die Abfertigungsrate des betrachteten Arbeitssystems über einen längeren Zeitraum der Ankunftsrate entspricht, so resultiert ein erster mathematischer Bezug zwischen Bestand, Leistung (Auslastung) und Durchlaufzeit.

Im Unterschied zur Trichterformel (siehe Abschnitt 2.4.3) berücksichtigt Little allerdings lediglich die Anzahl Fertigungsaufträge und nicht deren Arbeitsinhalt. So wirkt die Bearbeitungsreihenfolgeregel KOZ (Kürzeste-Operations-Zeit) unterschiedlich auf die Anzahl der an einem Arbeitssystem wartenden Fertigungsaufträge im Unterschied zur Trichterformel, bei welcher der Bestand in kumulierten Vorgabestunden berücksichtigt wird. Genauso unterscheidet sich das Verhalten bezüglich Bestand beim Anwenden der Reihenfolgeregel LOZ (Längste-Operations-Zeit) [NYH03].

2.4.2. Das Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Für den Fall, dass man Little's Law auf ein produktionstechnisches Arbeitssystem anwendet, lässt sich das Gesetz leicht veranschaulichen, wenn man sich das Arbeitssystem als Trichter vorstellt (vergleiche Abbildung 12, links). Dieses Ideen-Modell geht auf Plossl zurück [PLO85]. Bei dieser Betrachtungsart spielt es ebenfalls keine Rolle, ob es sich um einen einzelnen Funktionsplatz, eine Gruppe von Funktionsplätzen, einen Fertigungsbereich oder um die gesamte Fertigung handelt.

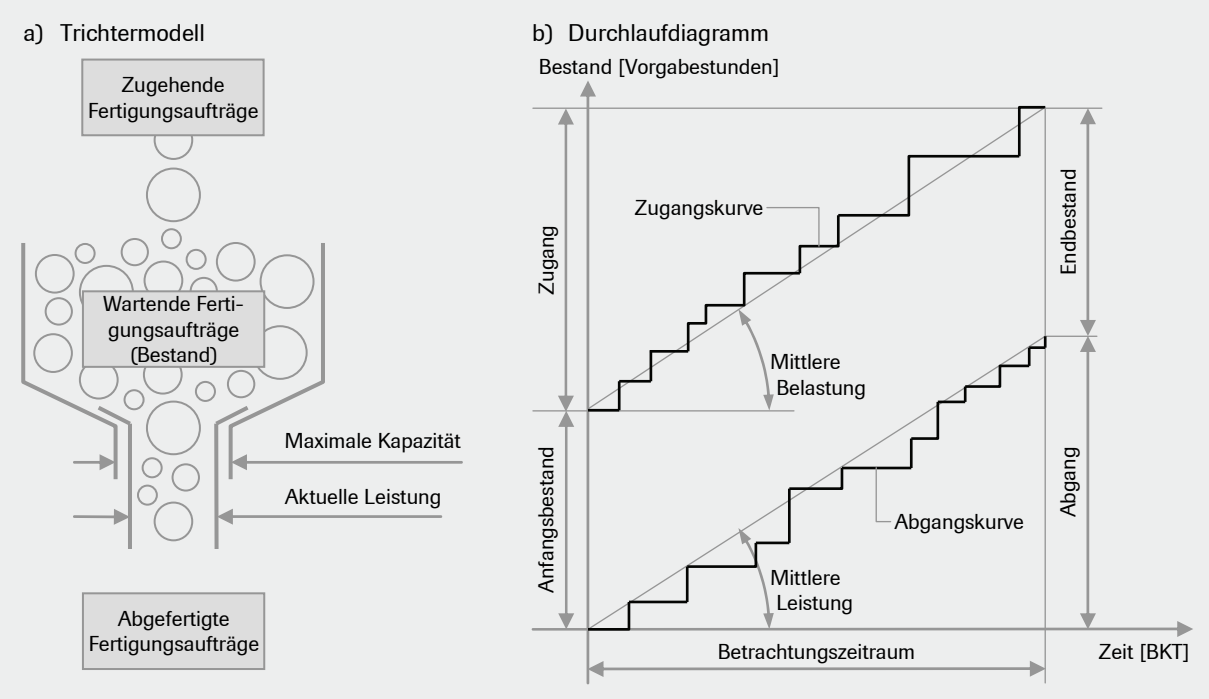


Abbildung 12: Trichtermodell (links) und daraus abgeleitete Grundform des Durchlaufdiagramms (rechts) eines Arbeitssystems [nach NYH03]

Im Trichtermodell, in der linken Hälfte der Abbildung 12, werden die Fertigungsaufträge in Form von Kreisen dargestellt. Die Grösse der Kreisrdurchmesser gibt, falls das Modell ein Arbeitssystem darstellt, den Arbeitsinhalt des aktuellen Arbeitsvorgangs wieder. Der Einbezug der Auftragszeiten in die Betrachtung erinnert an die Darstellung des vereinfachten, zweidimensionalen Durchlaufelements (siehe Abschnitt 2.2.2). Der Trichter stellt das Arbeitssystem, bestehend aus Warteschlange und Funktionsplatz, dar. Input sind zugehende Fertigungsaufträge von Arbeitssystemvorgängern oder ab Auftragsliste. Die Trichteröffnung symbolisiert die Leistung des Arbeitssystems, welche innerhalb der Kapazitätsgrenzen variiert werden kann. Der Output sind Fertigungsaufträge, deren Arbeitsvorgang abgearbeitet wurde. Sie gehen zum nächsten Arbeitssystem oder sind beendet, falls es sich um den letzten Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags handelte.

Die Ereignisse am Trichter lassen sich in das Durchlaufdiagramm in der rechten Bildhälfte der Abbildung 12 übertragen. Dazu werden die abgearbeiteten Arbeitsvorgänge mit ihrem Arbeitsinhalt in Vorgabestunden (d_{ZAU}) kumulativ über der Zeitachse aufgetragen. Dies erfolgt jeweils zum Zeitpunkt des Ereignisses (Bearbeitungsende des Arbeitsvorgangs gemäss BDE) und es resultiert die Abgangskurve des Arbeitssystems. Analog dazu erfolgt die Herleitung der Zugangskurve: die Arbeitsinhalte der zugehenden Fertigungsaufträge werden ebenfalls kumulativ zum Zeitpunkt des Zugangs aufgetragen. Das Zugangsereignis entspricht zeitlich dem Bearbeitungsende am Vorgängerarbeitssystem (siehe Ausführungen und Definitionen zum Durchlaufelement in Abschnitt 2.2.2). Es wird ebenfalls durch die BDE verfügbar gemacht. Der Beginn der Zugangskurve auf der y-Achse ist durch den Bestand am Arbeitssystem festgelegt, welcher zu Beginn des Betrachtungszeitraums effektiv vorhanden ist. Am Ende des Betrachtungszeitraums kann der Endbestand des Arbeitssystems abgelesen werden. Die mittlere Steigung der Zugangskurve heisst mittlere Belastung und die mittlere Steigung der Abgangskurve wird mittlere Leistung genannt. Generell gilt, dass bei einem stabilen und eingeschwungenen System und einem langen Betrachtungszeitraum der Zugang und der Abgang parallel zueinander verlaufen müssen [NYH03].

Das Durchlaufdiagramm beschreibt das dynamische Verhalten eines Arbeitssystems qualitativ und zeitpunktgenau (Ereignisse). Es zeigt die Wirkungszusammenhänge zwischen den produktionslogistischen Zielgrössen auf und macht sie einer mathematischen Beschreibung zugänglich.

Der Bestand

Der Bestand des Arbeitssystems ist zu jedem Zeitpunkt t als vertikaler Abstand zwischen der Abgangs- und der Zugangskurve gegeben. Er entspricht dem Arbeitsinhalt der Fertigungsaufträge, welche sich in der Warteschlange des Arbeitssystems oder in Bearbeitung befinden. Der mittlere Bestand berechnet sich, indem man die Bestandsfläche durch die Dauer des Betrachtungszeitraums dividiert. Die Bestandsfläche selbst kann durch Differenzbildung der Flächeninhalte unter der Zugangs- und der Abgangskurve berechnet werden. Es gilt somit für den mittleren Bestand:

$$\overline{B_i} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \varphi_{ZU}\,dt - \int_{t_0}^{t_1} \varphi_{AB}\,dt}{t_1 - t_0} \tag{2.20}$$

mit	$\overline{B_i}$	Mittlerer Bestand des AS_i [h]
	φ_{ZU}	Bestandszugang [h]
	φ_{AB}	Bestandsabgang [h]
	t_0	Beginn des Betrachtungszeitraums [BKT]
	t_1	Ende des Betrachtungszeitraums [BKT]

Die Durchlaufzeit

Bei einer strikten Abfertigungsreihenfolge nach dem FIFO-Prinzip (First In – First Out) liegen die Durchlaufelemente der Fertigungsaufträge exakt zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve. Würde man die einzelnen Durchlaufelemente in der Abbildung 12 einzeichnen, so erkennte man eine vom FIFO-Prinzip abweichende Bearbeitungsreihenfolge daran, dass der Beginn der Durchlaufelemente nicht mit dem Verlauf der Zugangskurve zusammenfällt.

Im Abschnitt 2.2.2 wurde eine zweite Dimension des Durchlaufelements eingeführt (siehe Abbildung 6). Die vertikale Ausdehnung entspricht dem Arbeitsinhalt der Fertigungsaufträge. Durch diese Gewichtung in Form einer zweiten Dimension entsteht für jeden abgearbeiteten Arbeitsvorgang ein Flächenelement. Die Summe dieser Flächenelemente wird Durchlaufzeitfläche genannt. Das Verhältnis der Durchlaufzeitfläche zum Abgang ergibt die mittlere, gewichtete Durchlaufzeit:

$$\overline{d_{AVG\ gew}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{AVG\ i} \cdot d_{ZAU\ i})}{\sum_{i=1}^{n} d_{ZAU\ i}}$$

Diese Berechnung entspricht (2.6). Die Gewichtung mit den Arbeitsinhalten in Vorgabestunden erlaubt es, Arbeitssysteme unabhängig von der Auftragsstruktur zu untersuchen, da der Bezug zum Auftrag verschwindet [NYH03].

Die Auslastung

Die in der rechten Bildhälfte der Abbildung 12 eingezeichnete mittlere Leistung entspricht dem Verhältnis des Abgangs (abgearbeitete Vorgabestunden) zur Länge des Bezugszeitraums. Dabei ist der Abgang gleich der während des Bezugszeitraums zurückgemeldeten Arbeitsinhalte und entspricht der Definition (2.15). Die Auslastung ist das Verhältnis aus mittlerer Leistung und möglicher Leistung (also der maximal möglichen Kapazität des Arbeitssystems) und entspricht der Definition (2.16). Die Ausführungen in Abschnitt 2.3.3 haben gleichermassen Gültigkeit.

Die Termintreue

Zur Darstellung der Terminabweichung auf Stufe Arbeitsvorgang kann jedem Ist-Termin der jeweilige Plantermin gegenüber gestellt werden. Betrachtet man die Abgangsterminabweichungen, so beschreiben Abweichungsflächen links von der Abgangskurve eine Verspätung, Flächen rechts von ihr eine verfrühte Fertigstellung [YU01]. Eine idealisierte Darstellung der mittleren Terminabweichung ist in Abbildung 14 abgebildet. Die Ermittlung der Termintreue aus der Terminabweichung wird analog den Ausführungen in Abschnitt 2.3.4 durchgeführt. Berücksichtigt man ebenfalls die vertikale Dimension so erfährt auch diese Betrachtung eine Gewichtung.

2.4.3. Die Trichterformel

Im Unterschied zur Durchlaufzeit, die sich auf den Fertigungsauftrag oder dessen Bestandteile bezieht, ist die mittlere Reichweite eine Kenngrösse, welche sich auf das Arbeitssystem bezieht. Nimmt man beispielsweise an, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt keine Arbeitszugänge mehr zu einem Arbeitssystem stattfinden, so drückt die Reichweite aus, für wie lange das Arbeitssystem noch „beschäftigt“ sein wird (unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge).

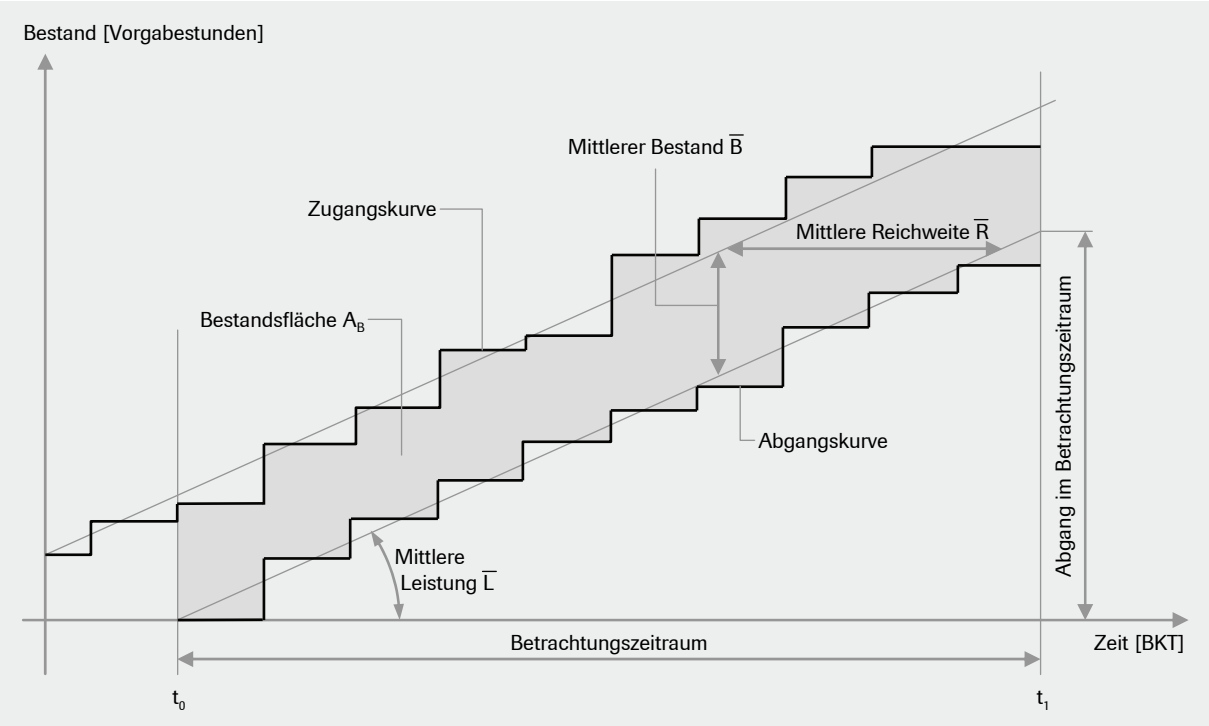


Abbildung 13: Zusammenhang von mittlerem Bestand, mittlerer Reichweite und mittlerer Leistung im Durchlaufdiagramm [nach BEC84]

Die Abbildung 13 zeigt den Zusammenhang von mittlerer Reichweite, mittlerem Bestand und mittlerer Leistung in einem Durchlaufdiagramm. Das Verhältnis der Bestandsfläche A_B, in Abbildung 13 grau hinterlegt, zum Abgang während der Dauer des Betrachtungszeitraums bzw. das Verhältnis des mittleren Bestands zur mittleren Leistung entspricht der mittleren Reichweite des Bestands. Diese Beziehung wird auch als *Trichterformel* bezeichnet [BEC84, WIE97, NYH03]:

$$\overline{R} = \frac{A_B}{\int_{t_0}^{t_1} \varphi_{AB}\, dt} = \frac{\overline{B}}{\overline{L}} \tag{2.21}$$

mit $\overline{R}$ Mittlere Reichweite des Bestands [BKT]

A_B Bestandsfläche [h · BKT]

Unter der Voraussetzung, dass im Rahmen der Abarbeitungsreihenfolge keine Vertauschungen vorgenommen werden, das FIFO-Prinzip also strikt eingehalten wird, gilt:

$$\overline{R} \cong \overline{d_{AVG\ gew}} \tag{2.22}$$

Idealisiert man im Durchlaufdiagramm die Zugangs- und Abgangskurven zu je einer Geraden, so entspricht der vertikale Abstand dem mittleren Bestand und der horizontale Abstand der mittleren Reichweite des Bestands (siehe Abbildung 13).

Analog zu Little's Law (siehe Abschnitt 2.4.1) lässt sich aus der Trichterformel ablesen, dass die mittlere Durchlaufzeit einer Fertigung reduziert werden kann, falls man entweder die mittlere Leistung steigert oder den mittleren Bestand verringert. Die Leistung eignet sich nur beschränkt als Regelgrösse im kurzfristigen Horizont einer Fertigungssteuerung, da sie sich aus der Marktnachfrage bzw. aus Kapazitätsrestriktionen ableitet. Der Bestand an einem Arbeitssystem andererseits wirkt direkt auf die Reichweite und nach (2.22) somit auch auf die Durchlaufzeit. Aufgrund der Ausführungen über das Polylemma der Fertigungssteuerung in Abschnitt 2.3.5 kann der Bestand

allerdings nicht beliebig reduziert werden, falls Auslastungsverluste am Arbeitssystem vermieden werden sollen.

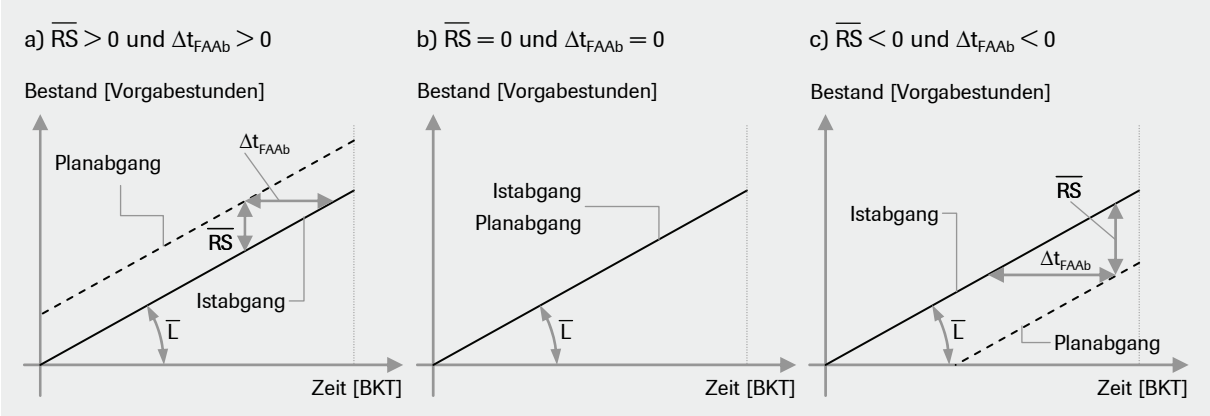


Abbildung 14: Darstellung von mittlerem Rückstand und mittlerer Terminabweichung im idealisierten Durchlaufdiagramm [LÖD01]

In der Abbildung 14 ist in einem idealisierten Durchlaufdiagramm zusätzlich der Planabgang eingezeichnet (siehe auch Termintreue in Abschnitt 2.4.2). Im Fall a) ganz links in der Abbildung 14 liegt der Planabgang zeitlich vor dem Istabgang. Im Fall b) decken sich Plan- und Istabgang und im Fall c) liegt der Planabgang nach dem Istabgang. Der vertikale Abstand zwischen Plan- und Istabgangskurve entspricht zu jedem Zeitpunkt dem Rückstand des Arbeitssystems. Der horizontale Abstand ist der Terminabweichung gleichzusetzen, falls die Fertigungsaufträge ihrer Dringlichkeit nach abgearbeitet werden [LÖD08]. Nach Yu [YU01] lässt sich aus der Trigonometrie in Abbildung 14 folgende Beziehung zwischen der Abgangsterminabweichung, dem Rückstand und der Leistung ableiten:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_1} \varphi_{AB} dt}{P} = \overline{L} = \frac{\overline{RS}}{\overline{\Delta t_{FAAb}}} \tag{2.23}$$

mit $\overline{RS}$ Mittlerer Rückstand [h]

Mit der Beziehung (2.23) lassen sich die Voraussetzungen für eine hohe Termintreue ableiten. Dies sind zum einen eine rückstandsfreie Fertigung und zum anderen die Fertigstellung der Aufträge in der geplanten Reihenfolge [LÖD08].

2.5. Die Produktionskennlinie

Mit den in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen logistischen Modellen Durchlaufdiagramm und Trichterformel können grundlegende Informationen über Produktionsabläufe gewonnen werden. Die Modelle ermöglichen dabei sowohl die Berechnung als auch die Visualisierung der produktionslogistischen Zielgrössen Durchlaufzeit, Bestand, Leistung (resp. Auslastung) und Terminabweichung (Termintreue). Die Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Grössen erfolgt jedoch nicht oder nur unvollständig, da das Durchlaufdiagramm immer nur einen stationären Zustand des Arbeitssystems wiedergibt [BRE01]. Auch die Trichterformel gibt keine Aussage darüber, wie sich beispielsweise die Leistung in Abhängigkeit zum Bestand entwickelt und welche Auswirkungen sich daraus für die Reichweite bzw. die Durchlaufzeit des Arbeitssystems ergeben.

Produktionskennlinien stellen den Verlauf der produktionslogistischen Zielgrössen Leistung (resp. Auslastung), Durchlaufzeit und Terminabweichung (resp. Termintreue) als Funktion des Bestands

dar. Im Gegensatz zu den Durchlaufdiagrammen ermöglichen Produktionskennlinien dadurch eine unmittelbare Aussage über die angemessene Höhe des Bestandsniveaus [LÖD01].

Die ersten Produktionskennlinien wurden simulativ ermittelt [BEC84, ERD84, WED89]. Sie wurden damals als Betriebskennlinien publiziert. Um die Benennung an den Elementarprozessen Produzieren, Prüfen, Transportieren und Lagern auszurichten wurde durch Nyhuis der Wechsel der Bezeichnung zu Produktionskennlinien vollzogen. Nyhuis ist es auch gelungen, die Produktionskennlinien mit Hilfe einer C-Norm-Funktion der Form (2.24) zu approximieren [NYH91]:

$$\left(x^C + y^C\right) = 1 \tag{2.24}$$

Diese Annäherungsgleichung ermöglicht es, die Zielgrössen Leistung und Reichweite als mathematische Funktion des Bestands zu formulieren. In Zusammenarbeit mit Ludwig hat Nyhuis zudem die Kennlinie für die Übergangs- und Durchlaufzeit entwickelt [LUD92]. Yu hat die Produktionskennlinie um die relative Terminabweichung sowie die Termintreue ergänzt [YU01].

Die Produktionskennlinie gehört thematisch ebenfalls in den Abschnitt der Modellierung der logistischen Zielgrössen, also in den Abschnitt 2.4. Aufgrund ihrer Relevanz im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sie in einem eigenen Abschnitt behandelt. Im Folgenden wird eine allgemeine Interpretation der Produktionskennlinie durchgeführt und anschliessend die Konstruktion der idealen Produktionskennlinie vorgestellt. Es folgt eine Zusammenfassung über die Herleitung der berechneten Produktionskennlinie. Ausführungen zur normierten Produktionskennlinie werden ausgelassen, da die normiert Produktionskennlinie im Entwurf der Steuerungs- und Regelstrategie nicht verwendet wird. Es wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [NYH91]. Ebenso wird die Darstellung und Berechnung der Zielgrösse Terminabweichung (Termintreue) in der Produktionskennlinie weggelassen, da die Steuerungs- und Regelungsstrategie dieser Arbeit auf einem Prinzip ohne terminierte Arbeitsvorgänge aufbaut (siehe Abschnitt 4.1). Der interessierte Leser findet unter [YU01] ausführliche Informationen über die Termintreue in Produktionskennlinien.

2.5.1. Allgemeine Interpretation der Produktionskennlinie

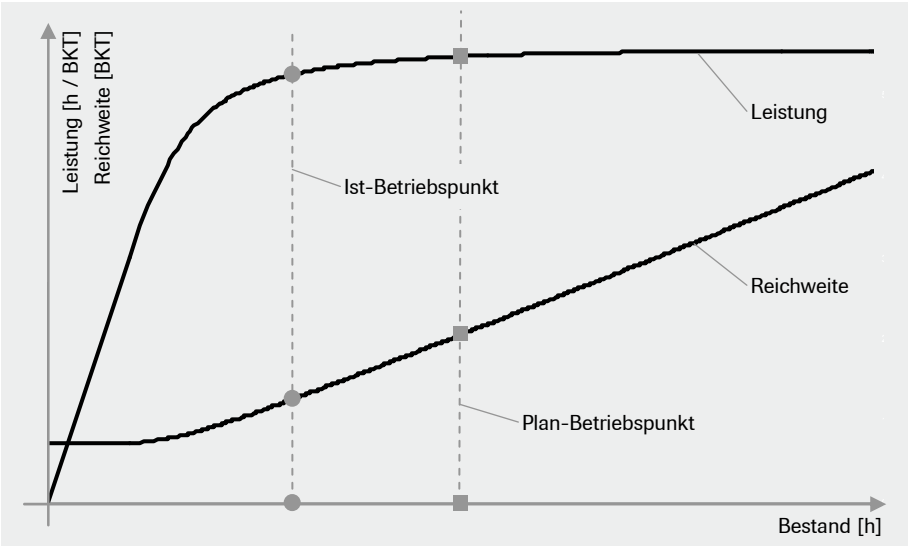


Abbildung 15: Verlauf der Produktionskennlinie für die Zielgrössen der Fertigungssteuerung Bestand, Leistung, Reichweite [NYH91, LÖD01, YU01] und einem beispielhaften Ist- und Plan-Betriebspunkt

In der Grundform der Produktionskennlinie wird der mittlere Bestand eines Arbeitssystems entlang der Abszisse in der Einheit [h] festgelegt. Auf der Ordinate wird die vom mittleren Bestand

abhängige mittlere Leistung in der Einheit [h / BKT] aufgetragen. Ebenfalls auf der y-Achse wird die bestandsbedingte Reichweite des Arbeitssystems in der Einheit [BKT] zugeteilt.

In der Abbildung 15 ist der Verlauf einer Produktionskennlinie wiedergegeben. Es ist ersichtlich, dass ein momentaner Zustand eines Arbeitssystems genau einem Betriebspunkt auf der Produktionskennlinie entspricht (vertikale Abhängigkeit). Die Kennlinie stellt demnach dar, wie sich das Arbeitssystem bei unveränderten Randbedingungen betreffend Leistung und Reichweite verhält, wenn ein anderer Bestand eingestellt wird. Für ein Arbeitssystem ist zu jedem Zeitpunkt t ein eindeutiger Zustand in der Produktionskennlinie gegeben (Ist-Betriebspunkt). Es ist auch möglich, verfolgte Zustände einzutragen (z.B. in Form eines Plan-Betriebspunktes). In der Abbildung 15 sind zwei solche Betriebspunkte beispielhaft in der Produktionskennlinie eingezeichnet.

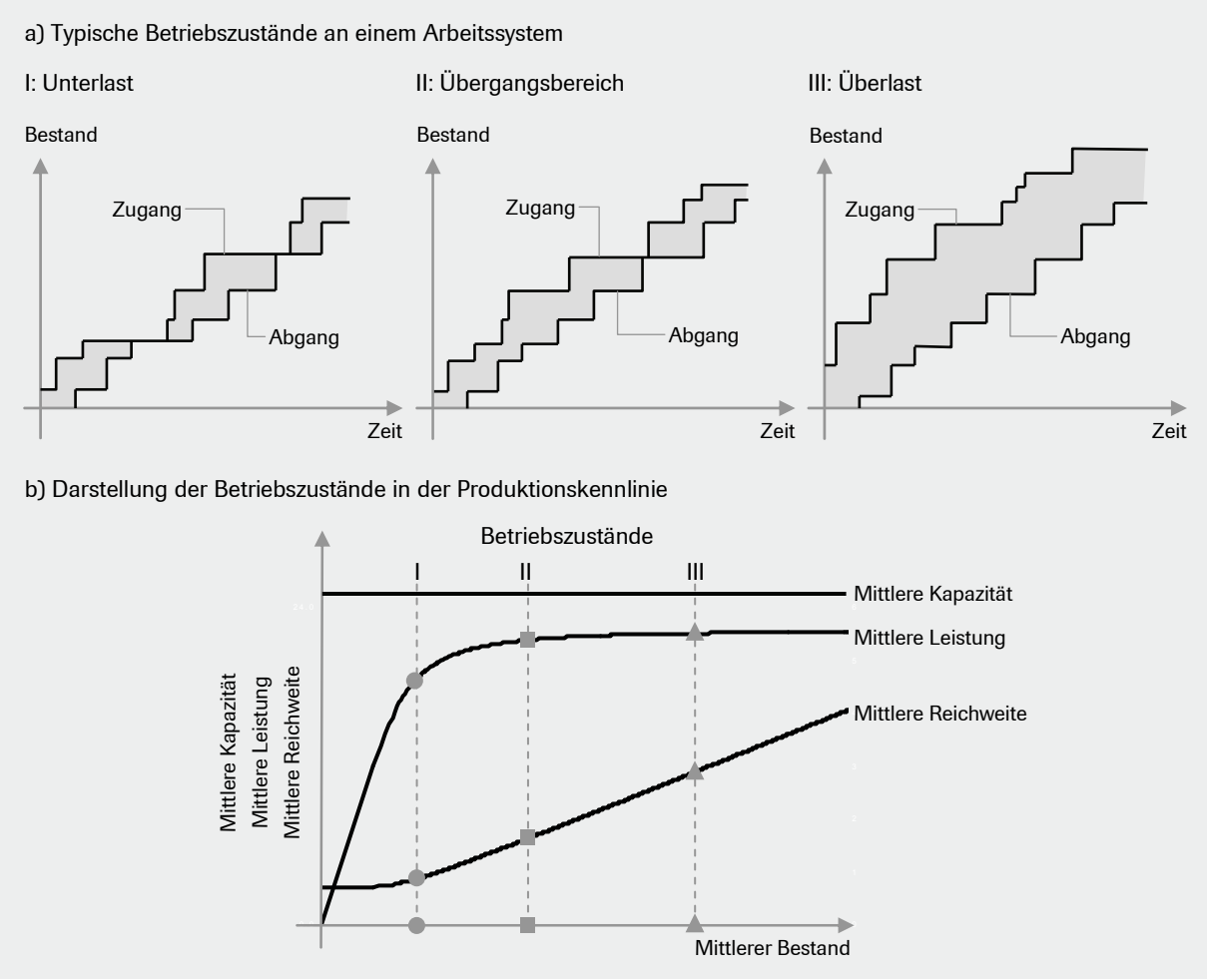


Abbildung 16: Darstellung typischer Betriebszustände an einem AS im Durchlaufdiagramm (oben) und Darstellung derselben Betriebszustände in der Produktionskennlinie (unten) [NYH03]

Die Abbildung 16 zeigt im oberen Bildteil in vereinfachten Durchlaufdiagrammen drei grundsätzlich unterschiedliche Betriebszustände eines Arbeitssystems. Die in den verschiedenen Betriebszuständen gemessene Leistung, Durchlaufzeit und Bestand werden zu einer Produktionskennlinie verdichtet und in der unteren Hälte der Abbildung 16 dargestellt.

Die Produktionskennlinie in Abbildung 16 bringt zum Ausdruck, dass sich die Leistung eines Arbeitssystems oberhalb eines bestimmten Bestandswertes nur noch unwesentlich verändert. Da permanent Fertigungsaufträge für den Funktionsplatz aus der Warteschlange verfügbar sind treten keine bestandsbedingten Beschäftigungsunterbrechungen auf. Unterhalb dieses Bestandswertes kommt es zunehmend zu Leistungseinbussen infolge von zeitweilig fehlendem Arbeitsvor-

rat. Dies ist vergleichbar mit einem gelegentlichen Leerlaufen des Trichtermodells. Die Durchlaufzeit steigt oberhalb des kritischen Bestandswertes gemäss Trichterformel (2.21) proportional mit dem Bestand an. Sie sinkt mit abnehmendem Bestand. Die Durchlaufzeit kann ein Minimum, das durch die mittlere Durchführungszeit der Arbeitsvorgänge gegeben ist, nicht unterschreiten. Aus diesem Grund verläuft die Reichweitenkennlinie nicht durch den Nullpunkt, sondern nimmt bei tiefen Beständen einen horizontalen Verlauf ein.

Ausgehend von den drei Betriebszuständen in der oberer Bildhälfte in Abbildung 16 kann die Produktionskennlinie in entsprechende Bereiche gegliedert werden. Der Bereich um den kritischen Bestandswert herum wird als Übergangsbereich bezeichnet. Bestandswerte links davon gehören zum Bereich Unterlast, höhere Bestandswerte fallen in den Bereich der Überlast [WIE97].

Die Produktionskennlinie ermöglicht es, konsistente Zielwerte für Bestand, Leistung und Durchlaufzeit eines Arbeitssystems vorzugeben. Mit der Kennlinie ist unmissverständlich vorgegeben, dass eine maximale Leistung mit gleichzeitig minimalem Bestand nicht realisierbar ist. Somit gibt die Produktionskennlinie im Rahmen der Zielgrössenoptimierung Randbedingungen vor. Weiter kann nachvollzogen werden, dass die Inkaufnahme von (geringen) Leistungsverlusten eine überproportionale Reduktion der Reichweite und somit Durchlaufzeit eines Arbeitssystems ermöglicht. Die leichten Leistungsverluste fallen auf einem tieferen Bestandsniveau an als für einen Verlauf der Leistungskurve im gesättigten Bereich erforderlich ist. Die Forderung von Lödding [LÖD01], dass ein Steuerungsverfahren den Bestand eines Arbeitssystems möglichst nahe am verfolgten (geplanten) Bestand regeln kann, wird im Rahmen der Kennliniendiskussion verständlich.

2.5.2. Die idealisierte Produktionskennlinie

Die Ausgangsbasis zur Ableitung einer Näherungsgleichung zur Berechnung der Produktionskennlinie in Abschnitt 2.5.3 besteht in einer analytischen Betrachtung idealisierter Fertigungsabläufe [NYH91]. Die Idealisierung der Fertigungsabläufe besteht darin, dass die Bearbeitung eines Fertigungsauftrags an einem Arbeitssystem unmittelbar nach seinem Zugang erfolgt. Die Übergangszeit d_{ZUE} (vgl. Abschnitt 2.2.2) zwischen zwei Arbeitsvorgängen beträgt demnach Null. Weiter beinhaltet die Idealisierung, dass zum Zeitpunkt eines Abgangs vom Arbeitssystem gleichzeitig auch ein Zugang stattfindet. Der Bestand am Arbeitssystem beträgt somit konstant einen Fertigungsauftrag. Mit der Restriktion eines losweisen Transports sowie auch einer losweisen Bearbeitung ergibt sich der effektive Bestand am Arbeitssystem unmittelbar aus den Auftragszeiten der zu bearbeitenden Arbeitsvorgänge. In Abbildung 17 ist, unter den genannten idealen Bedingungen, der Verlauf des Bestands in Vorgabestunden über der Zeit dargestellt.

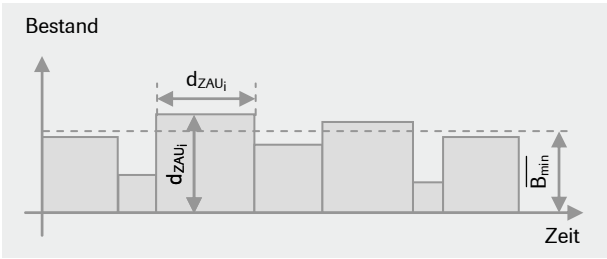


Abbildung 17: Bestandsverlauf eines Arbeitssystems unter idealisierten Bedingungen des Fertigungsablaufs und der resultierende ideale Mindestbestand [PET96]

Der aus den Auftragszeiten d_{ZAU} resultierende, mittlere Bestand in Abbildung 17, der im Folgenden als *idealer Mindestbestand* bezeichnet wird, lässt sich wie folgt berechnen [WIE97]:

$$\overline{B_{\min}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{ZAU\,i} \cdot d_{ZAU\,i})}{\sum_{i=1}^{n} d_{ZAU\,i}} \tag{2.25}$$

mit $\overline{B_{\min}}$ (Mittlerer) idealer Mindestbestand [h]

n Anzahl Arbeitsvorgänge [-]

Es ist in Erdlenbruch [ERD84] gezeigt, dass (2.25) überführbar ist in:

$$\overline{B_{\min}} = \overline{d_{ZAU}} + \frac{(\sigma_{d_{ZAU}})^2}{\overline{d_{ZAU}}} \tag{2.26}$$

mit $\sigma_{d_{ZAU}}$ Standardabweichung von d_{ZAU} [h]

Durch diese Überführung wird deutlich, dass der ideale Mindestbestand aus einem Anteil für das Auftragszeitniveau (Mittelwert der Vorgabezeiten) sowie einem Anteil für die Streuung der Auftragszeiten besteht. Die Standardabweichung der Vorgabezeiten geht quadratisch in den idealen Mindestbestand ein. Das bedeutet, dass der Wert des idealen Mindestbestands quadratisch zur Streuung der Auftragszeiten ansteigt.

Die maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems ergibt sich im Wesentlichen aus der Kapazität. Die Leistungsgrenze eines Arbeitssystems wird, wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, durch den restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel oder Personal) bestimmt. Zusätzliche, mögliche Leistungsreduktionen (z.B. Maschinenausfälle) werden im Rahmen des idealisierten Fertigungsablaufs vernachlässigt. Somit dürfen Leistung und Kapazität im Rahmen der idealen Produktionskennlinie gleichgesetzt werden. Für die ideale Mindestreichweite ergibt sich gemäss Trichterformel (2.21):

$$\overline{R_{\min}} = \frac{\overline{B_{\min}}}{K} \tag{2.27}$$

mit $\overline{R_{\min}}$ (Mittlere) ideale Mindestreichweite [BKT]

Mit Zuhilfenahme des idealen Mindestbestands, der Kapazität sowie der Trichterformel (2.21) ergibt sich für die ideale Produktionskennlinie eines realen Arbeitssystems eine einfache Konstruktionsanweisung gemäss (2.28) und (2.29):

$$\overline{L} = \begin{cases} \dfrac{K \cdot \overline{B}}{\overline{B_{\min}}} & , \overline{B} < B_{\min} \\ K & , \overline{B} \geq B_{\min} \end{cases} \tag{2.28}$$

$$\overline{R} = \begin{cases} \overline{R_{\min}} & , \overline{B} < B_{\min} \\ \dfrac{\overline{B}}{K} & , \overline{B} \geq B_{\min} \end{cases} \tag{2.29}$$

Im idealen Fertigungsablauf ist die maximale Leistung des Arbeitssystems durch die Kapazität gegeben und kann als horizontale Gerade aufgetragen werden. Das gilt für Bestände grösser als der ideale Mindestbestand. Die Position des Abknickpunktes der Leistungskurve ist durch den idealen Mindestbestand bekannt und verläuft ab diesem linear durch den Ursprung des Koordinatensys-

tems. Der Verlauf der Reichweitenkurve ist gemäss Trichterformel für Bestände grösser als der ideale Mindestbestand definiert. Für Bestände kleiner als der ideale Mindestbestand wird die Reichweite als horizontale Gerade auf dem Niveau der idealen Mindestreichweite eingetragen.

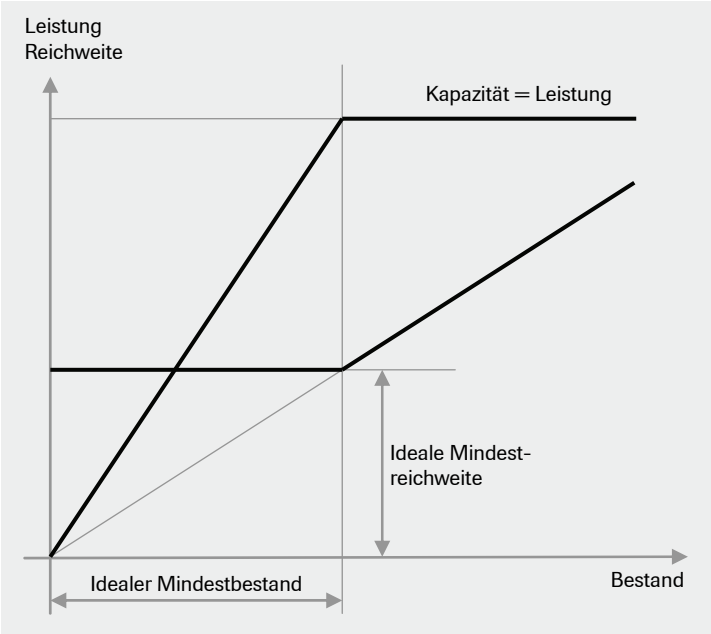


Abbildung 18: Konstruktion der idealen Produktionskennlinie mit Hilfe des idealen Mindestbestands, der Kapazität und der Trichterformel [WIE97]

Die Darstellung von (2.28) und (2.29) ist in Abbildung 18 als ideale Produktionskennlinie ersichtlich. In der idealen Produktionskennlinie ist erkennbar, dass unter der Voraussetzung eines idealen Bestandsverlaufs wie in Abbildung 17 die maximale Leistung bei gleichzeitig minimaler Durchlaufzeit realisiert wird. Falls sich im betrieblichen Ablauf, entgegen den idealisierten Voraussetzungen, zeitweilig kein Fertigungsauftrag im Bestand des betrachteten Arbeitssystems befindet, ergeben sich im Bestandsverlauf der Abbildung 17 Lücken. Der mittlere Bestand ist geringer als der ideale Mindestbestand und aufgrund des Materialflussabrisses entstehen Leistungseinbussen, welche sich proportional zur Bestandsreduktion verhalten. Dieser Sachverhalt ist in der idealen Kennlinie in Abbildung 18 nachvollziehbar, falls man sich den mittleren Bestand des Arbeitssystems links vom idealen Mindestbestand vorstellt. Die mittlere Durchlaufzeit bleibt konstant, da sie nicht kleiner als die ideale Mindestreichweite werden kann. Befinden sich hingegen zeitweilig mehrere Fertigungsaufträge am Arbeitssystem, so ist der mittlere Bestand grösser als der ideale Mindestbestand in Abbildung 17. Eine Steigerung der Leistung ist in dem Falle nicht möglich, da das Arbeitssystem bereits an der Grenze der maximal möglichen Leistung betrieben wird. Die mittlere Durchlaufzeit steigt gemäss Trichterformel (2.21) proportional zum mittleren Bestandsniveau an, was sich durch die resultierenden Wartezeiten der Fertigungsaufträge erklären lässt.

Obwohl die der Berechnung der idealen Produktionskennlinie zugrunde liegenden Voraussetzungen in der Praxis nicht gegeben sind, wird in Wiendahl [WIE97] gezeigt, dass der Vergleich von realen und idealen Werten eine befriedigende Übereinstimmung ausweist. Hervorzuhebende Eigenschaften der idealen Produktionskennlinie sind die einfache Konstruktion sowie die überschaubare Anzahl der dazu notwendigen Daten. Eine für diese Arbeit wichtige Charakteristik der Produktionskennlinien ist, dass die Struktur der Fertigungsaufträge durch die Berechnung des idealen Mindestbestands nach (2.26) in den Kennlinien enthalten ist. Als Struktur der Fertigungsaufträge werden der Mittelwert und die Standardabweichung der Auftragszeiten d_{ZAU} verstanden.

2.5.3. Die berechnete Produktionskennlinie

Die im Abschnitt 2.5.2 formulierten Bedingungen eines idealen Fertigungsablaufs sind in der Praxis nicht gegeben. Insbesondere bei komplexen Fertigungsstrukturen mit ungerichteten Materialflüssen gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren, welche Abweichungen der realen Betriebspunkte von den idealen Produktionskennlinien verursachen. Insbesondere der Übergang vom Unterlast- in den Überlastbereich um den Abknickpunkt ist in der Realität fliessend (siehe Abbildung 19).

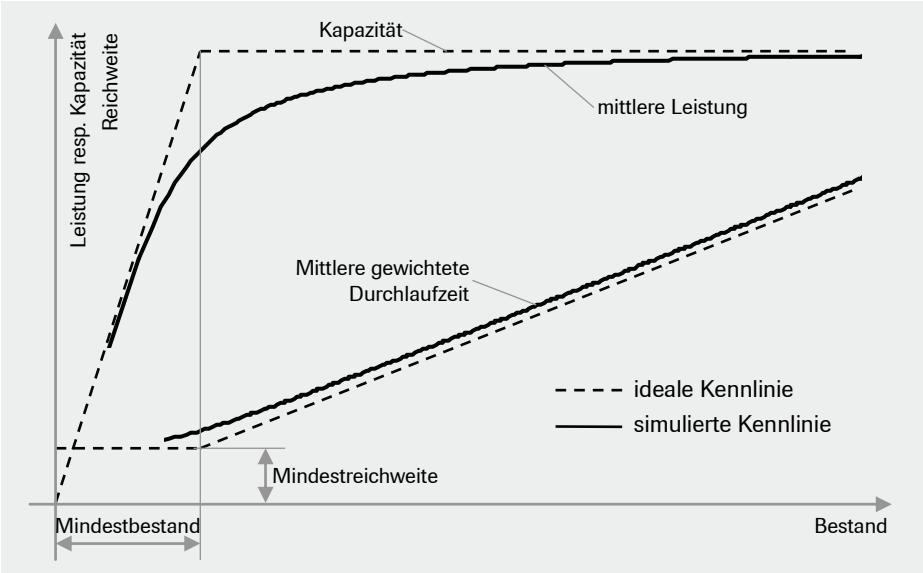


Abbildung 19: Vergleich von idealer und simulierter Produktionskennlinie [NYH03]

Es wird in Nyhuis [NYH91] gezeigt, dass die Abweichungen simulierter Produktionskennlinien von den idealen Produktionskennlinien im Wesentlichen von denselben Grössen abhängen, welche den Verlauf der idealen Produktionskennlinie bestimmen. Diese Erkenntnis führte dazu, die ideale Produktionskennlinie über eine affine Transformation als Bezugskoordinatensystem heranzuziehen und die realen Produktionskennlinien zu approximieren. Auf eine Herleitung der Näherungsgleichung und der darin enthaltenen Parameter wird verzichtet. Informationen dazu sind insbesondere Nyhuis [NYH91, NYH03] zu entnehmen. Die Gleichung spielt für den Entwurf der Steuerungs- und Regelungsstrategie eine wichtige Rolle und wird aus diesem Grund hier vorgestellt.

Die berechnete Produktionskennlinie sieht in ihrer parametrisierten Form wie folgt aus [NYH03][2]:

$$\overline{B}(s) = \overline{B_{\min}} \cdot (1-(1-\sqrt[4]{s})^4) + \overline{B_{\min}} \cdot \alpha \cdot s \tag{2.30}$$

$$\overline{L}(s) = L_{\max} \cdot (1-(1-\sqrt[4]{s})^4) \tag{2.31}$$

mit α Streckfaktor (Defaultwert: 10) [-]

s Laufvariable ($0 \le s \le 1$) [-]

$L_{\max}$ Maximal mögliche Leistung [h / BKT]

Der in (2.31) verwendete Ausdruck $L_{\max}$ setzt sich wie folgt zusammen:

$$L_{\max} = \frac{K \cdot \Gamma_{\max}}{100} \tag{2.32}$$

mit $\Gamma_{\max}$ Maximal mögliche Auslastung [%]

[2] In der Literatur, insbesondere auch in [NYH91], wird für die Laufvariable ein „t“ verwendet. Um Verwechslungen mit Ereignissen auf der Zeitachse auszuschliessen wird sie hier durch ein „s“ dargestellt.

Durch die Grösse der maximal möglichen Auslastung wird die Kapazität den realen Bedingungen angepasst. Dadurch werden, neben dem restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel oder Personal), weitere kapazitätsreduzierende Einflüsse wie technische Verteilzeiten etc. berücksichtigt. Die maximal mögliche Auslastung ist eine arbeitssystemspezifische Grösse, die sich aus Vergangenheitswerten ermitteln lässt (Auswertung der Maschinendaten, Aufschreibung, etc.). Auf eine Flexibilisierung der Kapazitäten mittels einer Kapazitätssteuerung wird in dieser Arbeit verzichtet. Die Begründung dazu erfolgt in Abschnitt 6.2.2.

Bei einem gegebenem idealen Mindestbestand, einer maximalen Leistung und dem Streckfaktor lässt sich mit dem Gleichungspaar (2.30) und (2.31) für jedes s ein Wertepaar für den Bestand und die Leistung berechnen. Die zum Wertepaar gehörende mittlere Reichweite berechnet sich wiederum mit Hilfe der Trichterformel (2.21) durch:

$$\overline{R}(s) = \frac{\overline{B}(s)}{\overline{L}(s)} \tag{2.33}$$

Aus der Kombination einer Reihe von diesen Wertetriplen ergibt sich dann die berechnete (reale) Produktionskennlinie. Die Interpretation der realen Produktionskennlinie entspricht den Ausführungen in den Abschnitten 2.5.1 und 2.5.2.

Der in (2.30) verwendete Streckfaktor α ist ein Parameter, welcher zur Streckung des Koordinatensystems in x-Richtung verwendet wird. Somit beeinflusst er auch die Lage des Abknickpunktes. Durch die Variation des Streckfaktors α schmiegt sich die reale Produktionskennlinie im Bereich des Abknickpunkts mehr oder weniger an die ideale Kennlinie. Die Abweichungen der realen Produktionskennlinie von der idealen gründen auf folgenden Einflussfaktoren [WIE97, NYH03]:

- Streuung im Auftragszugang an einem Arbeitssystem, da der Zugang in der Regel durch den Abgang mehrerer Vorgängerarbeitssysteme bestimmt wird, daher unterschiedlich stark streut und sich in der Praxis kaum ein idealisierter Bestandsverlauf einstellt
- Streuung der Arbeitsinhalte infolge der unterschiedlichen Werkstücke und der damit zusammenhängenden unterschiedlichen Rüst- und Einzelzeiten sowie der variablen Losgrösse
- Die „angebotenen“ Kapazitäten decken sich infolge der schwankenden Auftragszusammensetzung nie exakt mit dem effektiven Kapazitätsbedarf – das führt zu dynamischen Engpasssituationen
- Die Übergangszeiten zwischen den Arbeitsplätzen werden nicht nur durch die Ablauforganisation, sondern auch durch die Qualitätsprüfung, prozessbedingte Abkühlzeiten, etc. beeinflusst

Mit dem Streckfaktor α wird der Pufferbestand berücksichtigt, der zusätzlich zum Mindestbestand erforderlich ist, um unter realen Bedingungen eine Arbeitsvorratslücke (und damit Leistungsverluste des Arbeitssystems) zu verhindern. Somit kann mit dem Streckfaktor α eine Feinjustierung der Intensität der Auslastungsverluste im Knickpunktbereich, welche durch die eben aufgeführten Einflussfaktoren verursacht werden, vorgenommen werden. In Nyhuis [NYH03] wird gezeigt, dass der Defaultwert des Streckfaktors 10 betragen soll. Mit diesem Wert wurde insgesamt die höchste Übereinstimmung zwischen den berechneten Produktionskennlinien und den Simulationsergebnissen erzielt. Trotz variablem Streckfaktor α wurde auch festgestellt, dass die absoluten Abweichungen der resultierenden Leistungskennlinien untereinander nicht sehr ausgeprägt waren. Wird der Streckfaktor α als eine variable Grösse geführt, so ist die Möglichkeit gegeben, eine allfällige Adaption der Produktionskennliniengleichung an veränderte Rahmenbedingungen vorzunehmen und somit den Gültigkeitsbereich der Theorie auszuweiten.

3. Morphologie der Fertigungssteuerung

Auf der unterschiedlichen Funktionsweise von Steuerung und Regelung sowie auf den Erkenntnissen aus dem vorangehenden Abschnitt aufbauend wird in diesem Abschnitt ein Modell zur Fertigungssteuerung vorgestellt und diskutiert. Daraus werden Kriterien zur Erstellung eines morphologischen Schemas für Steuerungsverfahren abgeleitet. Eine Auswahl von existierenden Verfahren zur Steuerung von produktionstechnischen Systemen wird anhand dieser Kriterien analysiert und in der Morphologie dargestellt. Der Abschnitt schliesst mit einer Zusammenfassung der Vorstellung der existierenden Verfahren, aus welcher sich Gestaltungsgrundsätze für die zu entwickelnde Strategie zur Steuerung und Regelung von Fertigungen ergeben.

3.1. Vergleich von Steuerung und Regelung

Um vom klassischen Verständnis einer Fertigungssteuerung weg zum Verständnis einer Steuerungs- und Regelungsstrategie zu kommen ist es hilfreich, die Differenzen zwischen Steuerung und Regelung darzustellen. Deshalb werden zuerst die wesentlichen Charakteristikunterschiede in der Funktionsweise zwischen dem Prinzip Steuerung und dem Prinzip Regelung aufgezeigt. Das erfolgt mit Zuhilfenahme der Definitionen nach DIN:

Die DIN19226 definiert die Steuerung als Vorgang in einem System, „bei dem eine oder mehrere Grössen als Eingangsgrössen andere Grössen als Ausgangsgrössen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmässigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg […], bei dem die durch die Eingangsgrössen beeinflussten Ausgangsgrössen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrössen auf sich selbst wirken.“ Beim Steuern handelt es sich also ganz allgemein um Verfahren und Geräte zur planmässigen Beeinflussung von Abläufen und Prozessen [REI07].

Im Unterschied zur Steuerung wird nach DIN19226 bei der Regelung „fortlaufend eine Grösse, die Regelgrösse x, erfasst, mit einer anderen Grösse, der Führungsgrösse w, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgrösse beeinflusst. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgrösse im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“ Eine Regelung liegt also vor, wenn ein Prozess dynamisch auf einen Sollzustand hin beeinflusst wird, abhängig von einem laufenden Vergleich des Sollzustands mit dem Momentanzustand [REI07].

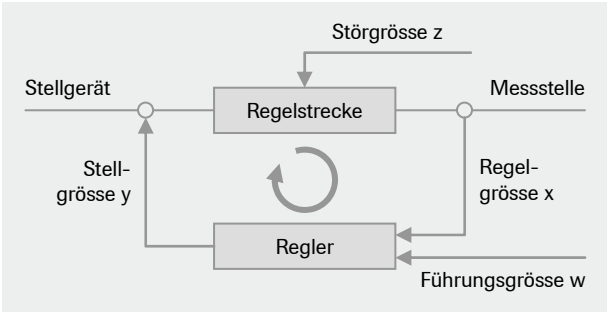


Abbildung 20: Prinzip der Regelung [nach REI07]

In der Abbildung 20 ist das Prinzip der Regelung dargestellt. Die Regelstrecke ist der Teil einer Anlage – oder im Rahmen dieser Arbeit das Modell eines Arbeitssystems – in dem die physikalische Grösse geregelt wird. Sie wird Regelgrösse x genannt und dauernd von einer Messeinrichtung (in der Abbildung 20 durch die Messstelle) erfasst. Der Wert von x (auch als Istwert der Regelgrösse bezeichnet) wird mit einem vorgegebenen Wert, der Führungsgrösse w (oder Sollwert

der Regelgrösse), verglichen. In die Regelstrecke ist eine geeignete Stelleinrichtung eingebaut, das Stellgerät. Durch die Betätigung der Stelleinrichtung kann die Regelgrösse beeinflusst werden. Das Signal zum Betätigen des Stellgeräts bezeichnet man als Stellgrösse y und wird durch den Regler erzeugt. Der Regler ist ein Gerät (oder eine Geräteanordnung), durch das automatisch eine Änderung der Stellgrösse vorgenommen wird, um die durch eine auf die Strecke wirkende Störgrösse z verursachte Regeldifferenz im Sinne der Regelung weitgehend zu eliminieren.

3.2. Modell der Fertigungssteuerung

Ausgehend vom Aachener PPS-Modell in Abschnitt 1.4.2 umfasst der in dieser Arbeit behandelte Aufgabenumfang der PPS einen kleinen Teil der gesamten Produktionsplanung und -steuerung. Die Bedeutung der Eigenfertigungssteuerung zur Erreichung der Zielgrössenvorgabe ist jedoch gross. Diese Bedeutung soll anhand eines Modells zur Fertigungssteuerung verdeutlicht werden (Abbildung 21). Das zugrunde liegende Modell wurde durch Lödding [LÖD08] entwickelt und soll den Einfluss der Aufgaben der Eigenfertigungssteuerung auf die Zielgrössen der Produktion verdeutlichen. Deshalb sind in Abbildung 21 die Wirkrichtungen der Regeldifferenzen auf die Zielgrössen der Produktion dargestellt. Das ursprüngliche Modell wurde mit den Wirkrichtungen der Regeldifferenzen auf die Aufgaben ergänzt. Diese Wirkrichtungen stellen analog zu Abbildung 20 die Stellgrössen dar. Dadurch ergeben sich geschlossene Wirkungsabläufe resp. Regelkreise.

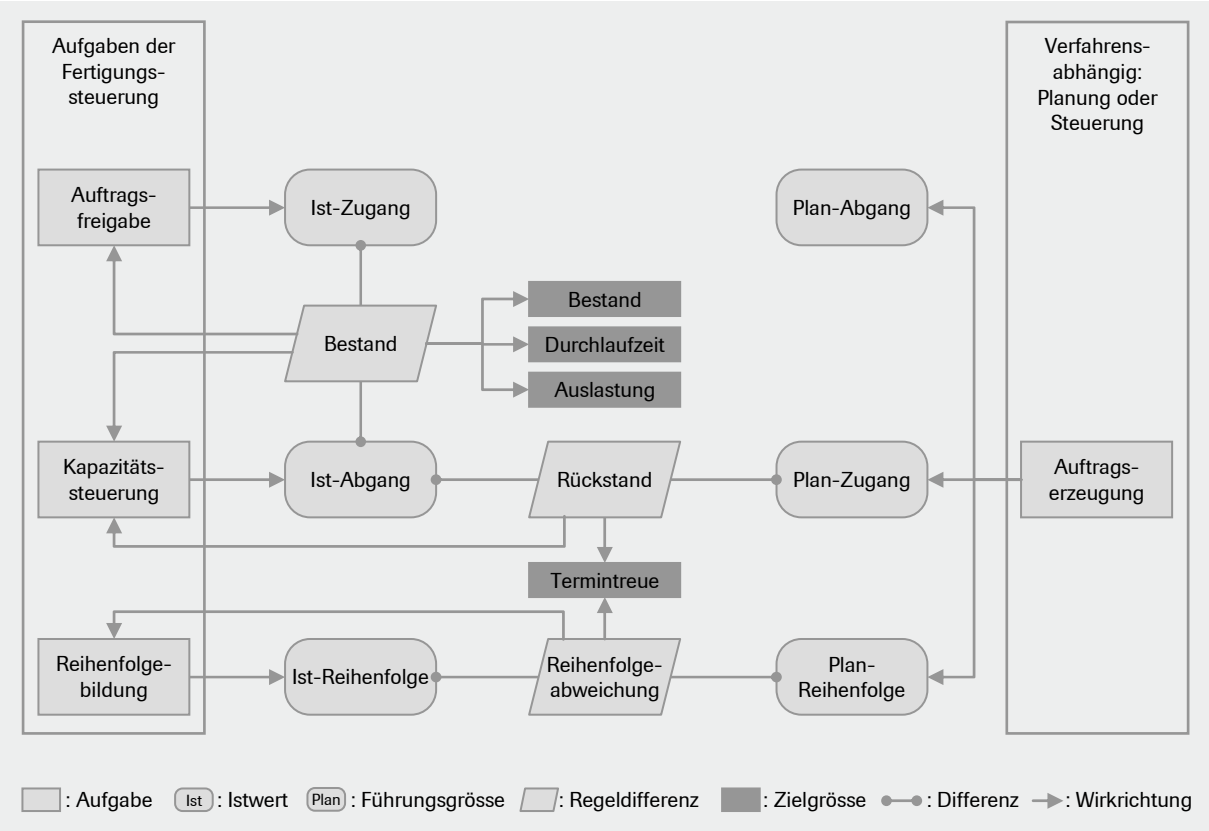


Abbildung 21: Modell zur Fertigungssteuerung nach Lödding [LÖD08] ergänzt mit den Wirkrichtungen zw. Regeldifferenz und Aufgabe sowie der verfahrensabhängigen Zuordnung der Aufgaben

Das Modell in Abbildung 21 besteht neben den Aufgaben der Fertigungssteuerung und zum Teil der Produktionsplanung aus Ist- und Sollwerten (Regel- und Führungsgrössen) und den Regeldifferenzen. Störgrössen sind in diesem Modell keine enthalten.

Im Rahmen der funktionalen Gliederung der PPS-Steuerungsaufgaben in Abbildung 4 fasst Hackstein die Aufgaben der Eigenfertigungssteuerung in die beiden Hauptfunktionen Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung respektive Auftragsumsetzung zusammen. Der Umfang der Aufgabeninhalte ist verfahrensabhängig und wird im Abschnitt 3.3 an den existierenden Steuerungsverfahren erörtert. Die Auftragsfreigabe ist in Abbildung 21 den Aufgaben der Fertigungssteuerung zugeordnet. Die Auftragsumsetzung und die dazu notwendige Auftragsüberwachung werden durch die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung repräsentiert und gehören ebenfalls zum Teilgebiet Fertigungssteuerung. Die Aufgabe der Auftragserzeugung kann, in Abhängigkeit des Verfahrens, der Planung oder der Steuerung zugeordnet werden (siehe Abschnitt 3.4).

Die Aufgaben der Fertigungssteuerung wirken direkt auf die Istwerte resp. Regelgrössen. Die Regelgrössen werden mit den Führungsgrössen verglichen, welche durch die Planung vorgegeben sind. Es ergeben sich Regeldifferenzen, auf welche die Aufgaben der Fertigungssteuerung entsprechend reagiert und wiederum die Regelgrössen beeinflusst.

Im Modell in Abbildung 21 existiert für jede Regelgrösse eine entsprechende Führungsgrösse. Nicht alle existierenden Verfahren verfügen über exakt diese Regelgrössen und nicht alle Verfahren verfügen über sämtliche Regelgrössen. Das Modell enthält die Gesamtheit des Aufgabenumfangs der Eigenfertigungssteuerung und soll an dieser Stelle eine Gedankenstütze zur Entwicklung eines morphologischen Schemas darstellen. Dies geschieht im folgenden Abschnitt.

3.3. Das morphologische Schema

Ausgehend vom Modell der Fertigungssteuerung in Abschnitt 3.2 werden Kriterien zum Aufspannen eines morphologischen Schemas herausgearbeitet. Dieses ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Merkmale sowie die denkbaren Ausprägungen der Merkmale werden im Folgenden vorgestellt. Um mit diesem Ideen- und Variantengenerator keine kurzschlüssigen Grenzen zu setzen verfügt jedes Merkmal zusätzlich über die Ausprägung „andere“. Diese wird nicht näher erläutert.

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	Verfahren der Auftragsfreigabe	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	dezentrale Entscheidungsfindung	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	nein	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	nach Dringlichkeit (Termin)	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	geplante	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	periodisch (ereignisorientiert)	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	in der Steuerung	andere	

Abbildung 22: Morphologisches Schema zur Charakterisierung bestehender Steuerungsverfahren

Mit der resultierenden Morphologie, wie sie in Abbildung 22 dargestellt ist, werden im nächsten Abschnitt 3.4 existierende Steuerungsverfahren vorgestellt und diskutiert.

1. Merkmal: Quelle der Fertigungsaufträge

Ein Steuerungsverfahren erzeugt entweder Fertigungsaufträge oder es gibt Fertigungsaufträge aus einer Auftragsliste frei (siehe Abbildung 21). Falls das Verfahren die Fertigungsaufträge erzeugt, dann ist das Verfahren ebenfalls für die Freigabe zuständig. Mischformen oder zusätzliche Quellen von Fertigungsaufträgen gelten als andere Verfahren und müssten jeweils definiert werden.

2. Merkmal: Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung

Aus Abschnitt 2.4 geht hervor, dass der Bestand eine wirksame Regelgrösse darstellen kann und einen direkten Zusammenhang mit den Zielgrössen hat. Je nach Abgrenzung kann es sich beim Modell in Abbildung 21 um den gesamten Fertigungsbereich handeln (Freigabe von Fertigungsaufträgen) oder um Arbeitssysteme (Bearbeitungsfreigabe von einzelnen Arbeitsvorgängen). Im letzteren Fall wird der Bestand des Nachfolger-Arbeitssystems beeinflusst. Dieser Punkt wird als 2. Merkmal für die Morphologie aufgenommen. Die Entscheidungsfindung zur AVG-Bearbeitung kann zentral oder dezentral erfolgen. Eine Kombination davon ist denkbar und wird ebenfalls als mögliche Merkmalsausprägung aufgenommen.

3. Merkmal: Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig

Gewisse Verfahren benötigen für die Aufgaben ‚Auftragsfreigabe', ‚Bearbeitungsfreigabe eines Arbeitsvorgangs' und/oder ‚Reihenfolgebildung' terminierte Arbeitsvorgänge. Unter einem terminierten Arbeitsvorgang wird ein Arbeitsvorgang mit einem geplanten Start- und Endtermin verstanden. Diese Plantermine werden durch ein Terminierungsverfahren in der Planung festgelegt. Mit dem 3. Kriterium sollen die Steuerungsverfahren danach differenziert werden, ob sie eine solche Terminierung benötigen. Gewisse Verfahren bedingen lediglich einen geplanten Starttermin des ersten Arbeitsvorgangs für die Freigabe des Fertigungsauftrags. Aus diesem Grund wird neben den Merkmalsausprägungen ja und nein auch diese Ausprägung aufgeführt.

4. Merkmal: Freigabe des Fertigungsauftrags

Ein Steuerungsverfahren ist - unabhängig von der Ausprägung des 1. Merkmals - zuständig für die Freigabe der Fertigungsaufträge. Dies kann unmittelbar durch die Erzeugung des Fertigungsauftrags der Fall sein. Eine weitere Möglichkeit ist die Freigabe aufgrund einer Dringlichkeit, die entweder durch einen festgelegten Plantermin oder andere Faktoren (offen) definiert ist. Die Freigabe kann auch infolge einer Bestandssituation in der Fertigung erfolgen.

5. Merkmal: Auftragspriorität

Als Auftragspriorität wird (mindestens) ein Wert pro Fertigungsauftrag verstanden, mit welchem es möglich ist, die Dringlichkeit des Fertigungsauftrags festzulegen. Die Auftragspriorität dient dem Verfahren in der Regel zur Durchführung der Aufgaben ‚Freigabe' (Auftragsfreigabe wie auch Bearbeitungsfreigabe eines Arbeitsvorgangs) und ‚Reihenfolgebildung'. Eine mögliche Merkmalsausprägung ist die geplante Auftragspriorität, d.h. die Priorität wird durch die Planung festgelegt und hat Gültigkeit bis zum nächsten Planungsdurchlauf. Eine weitere Ausprägung kann sein, dass sich die Priorität aus dem Systemzustand ableiten lässt. Falls das Verfahren keine Auftragsprioritäten benötigt kann davon ausgegangen werden, sofern nicht anders vermerkt, dass die Bearbeitungsfreigabe der Arbeitsvorgänge nach dem FIFO-Prinzip (First In – First Out) erfolgt.

6. Merkmal: Ermittlung der Regelgrössen

Nach dem ursprünglichen Modell von Lödding [LÖD08], das der Erweiterung in Abbildung 21 zugrunde liegt, stellen der Bestand, der Rückstand und die Reihenfolgeabweichung die Regelgrössen dar. In Anlehnung an die Ausführungen zum Regelprinzip in Abschnitt 3.1 ist die Qualität der erfassten Werte entscheidend. Diese hängt u.a. von der Erfassungsweise der Regelgrössen ab (Auslöseart der Erfassung). Falls die Regelgrössen periodisch erfasst werden, kann die Messung entweder durch einen einstellbaren Zeittakt ausgelöst werden oder ein Ereignis kann der Anstoss der Erfassung sein. Es besteht auch die Möglichkeit, dass das Verfahren unabhängig von den Regelgrössen funktioniert und somit ist keine Erfassung notwendig. Eine weitere mögliche Ausprägung dieses Merkmals ist die kontinuierliche Erfassung der Regelgrössen.

7. Merkmal: Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung

Eine Kapazitätssteuerung wirkt im Unterschied zur Kapazitätsplanung im kurzfristigen Zeithorizont. Das Ergebnis einer Kapazitätssteuerung ist somit die kurzfristige Erhöhung oder Reduktion der Kapazitäten. Ob dies realisierbar ist – bezogen auf die technischen Reserven der Anlagen und/oder der dazu notwendigen Flexibilität des Bedienpersonals – wird nicht als Gegenstand des 7. Merkmals verstanden. Das Merkmal analysiert die Verfahren dahingehend, ob sie überhaupt über die Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung verfügen und quantifizierte Entscheidungsgrundlagen bieten. Falls sie diese Möglichkeit bieten, soll unterschieden werden, ob diese Voraussetzungen im Planungsgebiet oder im Steuerungsgebiet anzuordnen sind.

3.4. Existierende Steuerungsverfahren

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht existierender Steuerungsverfahren gegeben. Es handelt sich dabei um die in der Literatur verbreiteten Verfahren. Daraus leitet sich kein Anspruch auf Vollständigkeit ab. Die Verfahren werden einheitlich in der Form vorgestellt, dass als erstes eine allgemeine Beschreibung des Verfahrens erfolgt. Anschliessend folgt eine Erläuterung der Funktionsweise der Verfahren, bevor die Verfahren im morphologischen Schema gemäss Abschnitt 3.3 dargestellt werden. Zum Schluss werden zentrale Punkte des Verfahrens herausgegriffen, sofern diese eventuell in Form von Gestaltungsgrundsätzen zur Entwicklung einer Strategie zur Steuerung und Regelung von Fertigungssystemen beitragen.

3.4.1. Das MRPII-Verfahren

Allgemeines

Das MRPII-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des MRP-Verfahrens, welches in den 60er-Jahren in den USA durch Oliver Wight entwickelt wurde [KAI92]. MRP (Material Requirement Planning) war hauptsächlich eine Stücklistenauflösung und bezweckte zu Zeiten der Massenproduktion die Beschaffungsdisposition zu unterstützen. Bei MRPII (Manufacturing Resource Planning) werden zusätzlich die Ressourcen mittels einer Auftragsterminierung auf Stufe Arbeitsvorgang berücksichtigt. Das MRPII-Verfahren ist heute – wie in der Einleitung bereits erwähnt – das am meisten verbreitete Verfahren [LÖD08]. Die Funktionen lassen sich eindeutig den Teilgebieten Planung oder Steuerung zuordnen. Die Planung generiert mittels eines sukzessiven Ablaufs über mehrere Stufen eine Liste mit Fertigungsaufträgen. Aufgabe der Steuerung ist es, diese Auftragsliste umzusetzen. Somit entspricht das Verfahren dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnier zwischen Planung und Steuerung (vgl. Abbildung 4).

Verfahrensbeschreibung

Ein grundlegender Gedanke des MRPII-Verfahrens ist, dass Entwicklung und Herstellung von Produkten teilweise weit vor der Kundennachfrage oder der Nachfrage aus höheren Produktionsstufen wegen der benötigten Durchlaufzeit geplant werden müssen [SCH07]. Dazu wird vorausgesetzt, dass der Produktionsprozess in weiten Teilen als im Voraus prognostizierbar bzw. determinierbar angesehen werden kann [WIL01]. Vor diesem Hintergrund besteht das Teilgebiet Planung des MRPII-Ansatzes aus einer sequentiellen Abarbeitung der PPS-Kernaufgaben über mehrere Planungsstufen. Das Ergebnis einer Planungsstufe stellt gleichzeitig die Ausgangsbasis der nachfolgenden Planungsstufe dar [WIN01]. Die Planung erfolgt sukzessive über mehrere Planungsstufen mit unterschiedlichen Planungshorizonten (vgl. Abbildung 23), wobei die Interdependenzen zwischen den einzelnen Planungsstufen negiert werden [SCH03b]. Damit hängt die Leistungsfähigkeit des Verfahrens von der Richtigkeit jener Annahmen ab, die auf den jeweiligen Planungsstufen für die nachfolgende Stufe als Rahmen gesetzt werden [SCH03b].

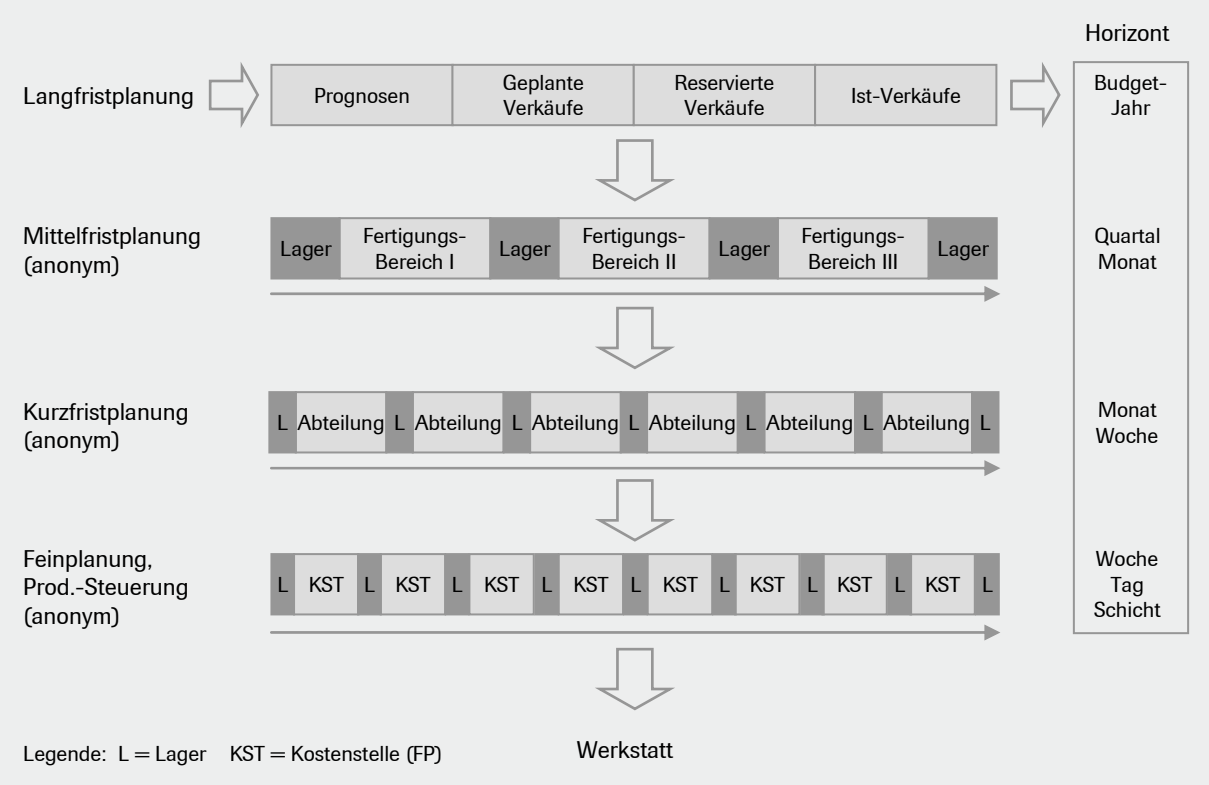


Abbildung 23: Sukzessive Abarbeitung der PPS-Kernaufgaben durch das MRPII-Verfahren über mehrere Stufen mit unterschiedlichen Zeithorizonten

Im Rahmen der Langfristplanung wird eine Bruttobedarfsermittlung auf Basis von Jahresbudgets durchgeführt. Der Bruttobedarf ist die Summe aller zeitperiodenbezogenen Bedarfe [SCH07]. Er umfasst Prognosen, Rahmenverträge, reservierte Verkäufe sowie bereits für die Zukunft vereinbarte Verkäufe. Dabei werden Primär- und Sekundärbedarfe unterschieden. Primärbedarfe sind ein vom Bedarf eines anderen Gutes unabhängige Bedarfe. Der Sekundärbedarf ist ein Bedarf, der einen direkten Bezug zum Bedarf eines anderen Gutes hat oder daraus abgeleitet werden kann (z.B. Baugruppen). Durch das den Zeitperioden entsprechende Bündeln und Herunterbrechen der Bedarfe entlang der Zeitachse werden die Bedarfsmengen zwangsläufig anonymisiert. Das bedeutet, dass ein ursprünglich exakt dem Besteller oder Disponent zuordenbarer Bedarf (Artikelnummer, Anzahl und Liefertermin) in dem Sinne verloren geht, dass dieser Bedarf für die weitere Planung nicht mehr als ein separates Los gehandhabt wird.

Auf Stufe Mittelfristplanung werden aus den Bruttobedarfen für das folgende Quartal (oder Monate) die Nettobedarfe abgeleitet. Dieser Vorgang entspricht der Mengenplanung. Nach Schönsleben ist der Nettobedarf „der zeitperiodenbezogene, negativ geplante verfügbare Bestand“ [SCH07]. Das bedeutet, dass periodengenau für Fertigerzeugnisse, Halbfabrikate und Einzelteile die physischen Bestände, Sicherheitsbestände, terminierte Lagerzugänge, Reservationen und resultierende verfügbare Bestände miteinander betrachtet werden und daraus die effektiv notwendigen Bedarfe, der Nettobedarf pro Periode, ermittelt wird. Der Nettobedarf entspricht somit der zu fertigenden Menge (Eigenfertigung) oder der zu beschaffenden Menge (Beschaffung) pro Zeitperiode. Aus den Nettobedarfen werden für die Eigenfertigung die Losgrössen bestimmt. Die Ermittlung der Losgrösse ist jeweils eine Optimierung, mit welcher z.B. der Rüstaufwand möglichst reduziert werden soll, um die Auslastung der Funktionsplätze hoch zu halten (grosse Losgrössen). Nach heutiger Anschauung sollen die Lose klein sein, um mit einem möglichst kontinuierlichen Materialfluss eine hohe Flexibilität und geringe Umlaufbestandskosten zu erzielen. Auf die verschiedenen Losgrössenverfahren (Andler-Formel, DOLOS [NYH91], etc.) wird nicht näher eingegangen (siehe dazu die Erläuterungen in Abschnitt 6.2.3).

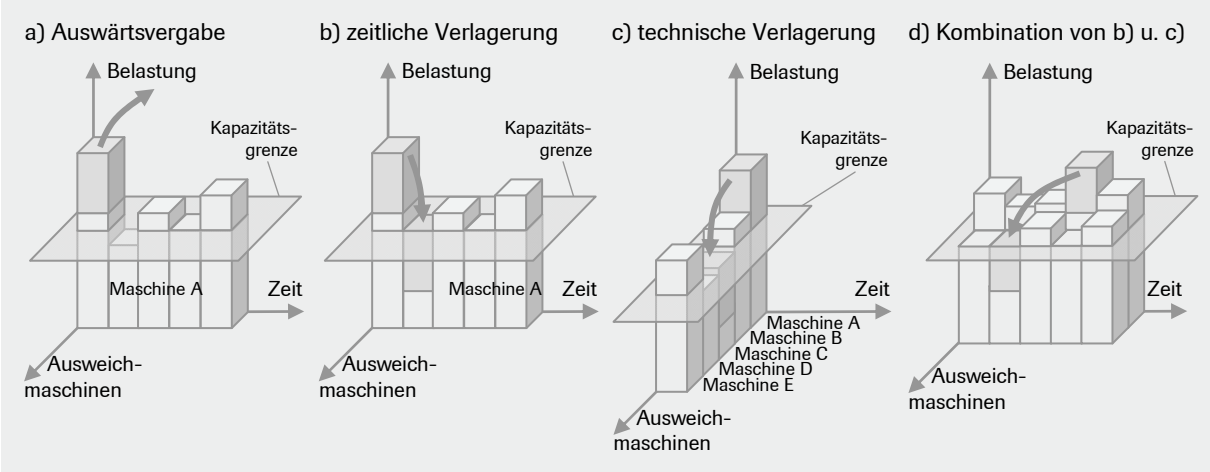


Abbildung 24: Möglichkeiten der Termin- und Kapazitätsplanung bei festen Kapazitäten [WIE97]

In der Stufe der Kurzfristplanung (Woche oder Monat) wird für die Eigenfertigung für die vorgängig bestimmten Fertigungslose eine Termin- und Kapazitätsplanung durchgeführt. Dies beginnt damit, dass pro Fertigungslos eine Durchlaufterminierung abläuft. Diese erfolgt auf Basis von in den Stammdaten hinterlegten Planübergangszeiten sowie mit Hilfe der Vorgabezeiten für Rüsten und Bearbeiten. Bei der Terminierung kann eine Vor-, Rückwärts- und Mittelpunktterminierung unterschieden werden. Es resultieren ressourcenspezifische Kapazitätsbedarfe entlang der Zeitachse. Dadurch ist eine Kapazitätsbedarfsermittlung pro Zeitabschnitt möglich. Die Aneinanderreihung der verschiedenen Kapazitätsbedarfe pro Zeitabschnitt ergibt ein Belastungsprofil pro Kapazitätsstelle entlang der Zeitachse. Die darauffolgende Kapazitätsabstimmung hat in der Regel zum Ziel, die Ressourcenbeanspruchung pro Zeitabschnitt zu „glätten“. Die möglichen Handlungsalternativen dazu – im Fall von festen Kapazitäten - sind in Abbildung 24 dargestellt. Auf der anderen Seite sind Kapazitätsanpassungen betreffend Häufigkeit und Intensität aufgrund des Anspruchs von geregelten Arbeitszeiten üblicherweise Grenzen gesetzt. Das Ergebnis der Kapazitätsabstimmung sind durchterminierte Fertigungsaufträge.

Die Arbeitsvorgänge der terminierten Fertigungsaufträge verfügen über einen geplanten Start- und Endtermin. Mit der Reihenfolgeplanung wird die kurzfristige Planung abgeschlossen. Es existieren fünf gängige Regeln zum Festlegen der Reihenfolgeplanung: FIFO (First In - First Out), LIFO (Last In - First Out), KOZ (Kürzeste Operationszeit, LOZ (Längste Operationszeit) und die Schlupf-

regel, welche die Aufträge nach ihrer Dringlichkeit auf Basis der Planendtermine pro Arbeitsvorgang sortiert (kürzeste Dauer bis zum Erreichen des geplanten Starttermins des Arbeitsvorgangs).

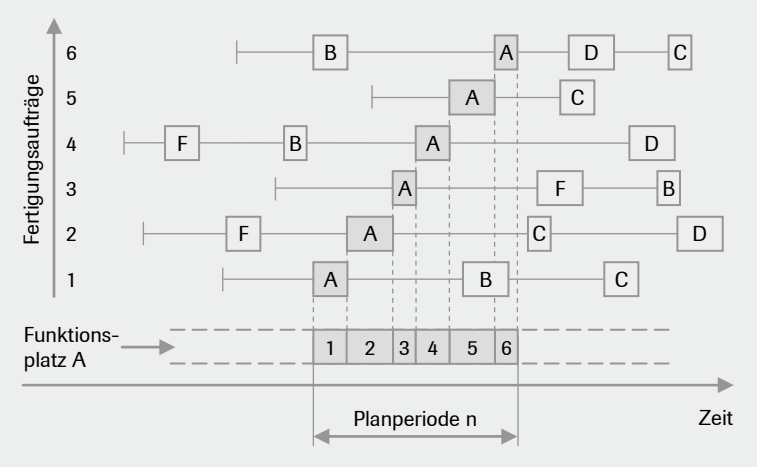


Abbildung 25: Geplante Beanspruchung des Funktionsplatzes A in der Planperiode n nach Durchführung der Termin- und Kapazitätsplanung [WIE97]

Die aus dem abgeschlossenen Planungsdurchlauf resultierende, geplante Beanspruchung eines Funktionsplatzes ist in Abbildung 25 (idealisiert) dargestellt. Aus dieser Darstellung lässt sich beispielsweise die Tragweite einer technischen Störung des Funktionsplatzes A leicht ableiten. Nicht nur das geplante„Programm“ auf dem Funktionsplatz A verzögert sich, sondern der von der Störung betroffene Fertigungsauftrag führt zu Verzögerungen und somit Programmverzerrungen auf anderen Funktionsplätzen. Denselben Effekt üben auch jene Arbeitsvorgänge auf alle Funktionsplätze aus, die nach der Störung auf dem Funktionsplatz A bearbeitet werden, da evtl. auch diese nicht mehr dem Planungsstand entsprechen (je nach Pufferzeit, die im idealisierten Beispiel in Abbildung 25 eliminiert ist).

Die Aufgabe der Steuerung reduziert sich demnach auf die Freigabe von Fertigungsaufträgen, sobald deren Planstarttermine erreicht (oder überschritten) sind und das erforderliche Material vorhanden ist [LÖD08]. Die Freigabe zur Bearbeitung eines einzelnen Arbeitsvorgangs erfolgt analog auf Basis der durch die Planung vorgegebenen Planstarttermine der Arbeitsvorgänge. Die Reihenfolgebildung in den Arbeitssystemen ist durch die Terminierung der Planung auf Stufe Arbeitsvorgangsebene bereits gegeben.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 26 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Das MRPII-Verfahren ist ein Vertreter der Verfahrensgruppe der Auftragsfreigabe (siehe Abbildung 26, 1. Merkmal). Obwohl die schlussendliche Auslösung einer Arbeitsvorgangsbearbeitung vor Ort gefällt wird (dezentral), lautet die Ausprägung des 2. Merkmals in Abbildung 26 „zentrale Entscheidungsfindung“. Dies aus dem Grund, weil derartige dezentrale Entscheidungen nicht Bestandteil des Verfahrens sind, sondern sich aus dem Umstand von abweichender Realität und Planung aufdrängen (Übersteuerung). Die primäre Entscheidung erfolgt im Rahmen der zentralen Planung durch Ermittlung eines Planstarttermins pro Arbeitsvorgang. Aus diesem Grund benötigt das Verfahren terminierte Arbeitsvorgänge (3. Merkmal in Abbildung 26). Die Auftragsfreigabe erfolgt nach einer terminierten Dringlichkeit (Planstarttermin des ersten Arbeitsvorgangs) und die Priorität der Fertigungsaufträge ist eine geplante Priorität, da sie sich aus den geplanten Start- und Endterminen der Fertigungsaufträge ableitet (siehe Abbildung 26, 4.

und 5. Merkmal). Das MRPII-Verfahren ist ein Planungsablauf über mehrere Stufen, wobei die Interdependenzen zwischen den Stufen negiert werden (siehe die Verfahrensbeschreibung). Es handelt sich um einen offenen Wirkungsablauf ohne unmittelbaren Rückkoppelungen. Entsprechend verfügt das Verfahren auch über keine direkt wirkenden Regelgrössen. Die Belastung der Arbeitssysteme wird periodisch, jeweils bei Planungsdurchlauf, erhoben (siehe Abbildung 26, 6. Merkmal). Die Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung sind durch die Termin- und Kapazitätsplanung gemäss Abbildung 25 in der Planung gegeben (siehe Abbildung 26, 7. Merkmal).

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	**zentrale Entscheidungsfindung**	dezentrale Entscheidungsfindung	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	**ja**	nein	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	**geplante**	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	**periodisch (zeitgetrieben)**	periodisch (ereignisorientiert)	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	**in der Planung**	in der Steuerung	andere	

Abbildung 26: Darstellung der Steuerungsfunktionalität des MRPII-Verfahrens in der Morphologie

Erkenntnisse

Das MRPII-Verfahren ist ein Verfahren mit dem Schwergewicht des Funktionsumfangs der PPS im Teilgebiet Planung. Dadurch reduziert sich der Funktionsumfang im Teilgebiet Steuerung massiv. Der Steuerungsteil ist der Planung zugeordnet. Durch den hierarchischen, stufenweisen Ablauf werden die wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Planungsstufen vernachlässigt. Das Verfahren verfügt über keine Rückkoppelung und somit auch keine Regelung. Dadurch kann auf kurzfristige Änderungen oder Störungen nur schlecht reagiert werden [WIN01, PAW07], da solche Ereignisse der übergeordneten Stufe erst beim nächsten Planungsdurchlauf bekannt sein werden. Ein kurzfristig erfasster Eilauftrag beispielsweise kann durch den Planungsüberbau noch gar nicht berücksichtigt sein [SCH03b]. Wenn vom Absatzmarkt her eintreffende Verkaufsaufträge in Quantität und/oder Zusammensetzung nicht den Vorgaben des Gesamtproduktionsplans entsprechen, resultieren Lager- und Umlaufbestände sowie eine Fehlmengenliste [RAY00]. Der Bezug zwischen einem Kundenauftrag und der Fertigungslosgrösse ist im klassischen Ablauf nicht herstellbar. Die Menge wird im Planungsablauf anonymisiert und fällt in ein „schwarzes Loch“ [WIL09]. Die Abstraktion ist komplex und erfolgt über verschiedene funktionale Abteilungsstrukturen und mehrstufige Stücklisten. Der Auftrag wird mit Start, Ende und Übergangszeiten versehen, verteilt und damit vermischt, vermengt mit Plan- und Kundenaufträgen und in anonymisierte Standardlosgrössen gegliedert. An dem MRPII-Vorgehen wird hauptsächlich kritisiert, dass zunehmend über die Zeit nur eine geringe Übereinstimmung zwischen der Planung und der tatsächlichen Produktion existiert [JUN07]. Eine auf Prognosen basierte Planung ist in der Praxis per Definition fehlerbehaftet [WIL09]. Über einen längeren Zeitabschnitt entspricht der reale Ablauf an den Funktionsplätzen

aufgrund von technischen Störungen, fehlendem Rohmaterial, etc. in den wenigsten Fällen dem durch die Planung vorgesehenen Ablauf. Aus diesen Gründen muss das Planungsergebnis häufig durch manuelle Eingriffe übersteuert werden [KEM08, LÖD08]. Solche Korrekturen sind nur nach hinten möglich. Dies wiederum vergrössert die Differenz zwischen effektivem Arbeitsfortschritt in der Werkstatt und letztem Planungsstand, was einem Spiraleffekt gleichkommt.

Fazit: +/- Grosser Planungsumfang, geringer Anteil an Steuerungsfunktionalitäten
+ Breites Einsatzgebiet (Variantenvielfalt)
- Oftmals mangelnde Transparenz, da Arbeitsfortschritt (Werkstatt) und Planung (System) nicht deckungsgleich sind

3.4.2. Das Kanban-Verfahren

Allgemeines

Die Grundidee der Kanbansteuerung besteht darin, dass jedes Arbeitssystem nur das nachfertigt, was das nachfolgende Arbeitssystem verbraucht hat. Nach Sheldon [SHE08] ist dies die einfachste, aber auch wichtigste Idee schlanker Materialflusssysteme. So soll eine Überproduktion vermieden und dennoch eine hohe Lieferbereitschaft sichergestellt werden. Nach Ohno – Vater des Toyota-Produktionssystems - ist die Überproduktion eine der sieben Verschwendungsarten [OHN88]. Dieses Verständnis eines betriebsinternen Kunden-Lieferanten-Verhältnisses lässt sich auch auf externe Kunden und Lieferanten übertragen.

Verfahrensbeschreibung

Ein „Kanban“ (janpanisch: Karte) ist eine wieder verwendbare Karte, die zwischen zwei Stellen hin- und herpendelt [SCH07]. Somit beschreitet ein Kanban einen Kreis. Dieser Informationskreislauf erfolgt eng verknüpft mit dem Materialfluss, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Es resultieren sogenannte selbststeuernde produkt- und verfahrensbezogene Regelkreise [WIL01]. Die Abbildung 27 stellt einen solchen Regelkreis dar. Der Regelkreis in dieser Abbildung besteht aus zwei Funktionsplätzen (FP), einem Erzeuger A und einem Verbraucher B mit den jeweils dazugehörenden Ein- und Ausgangslagern.

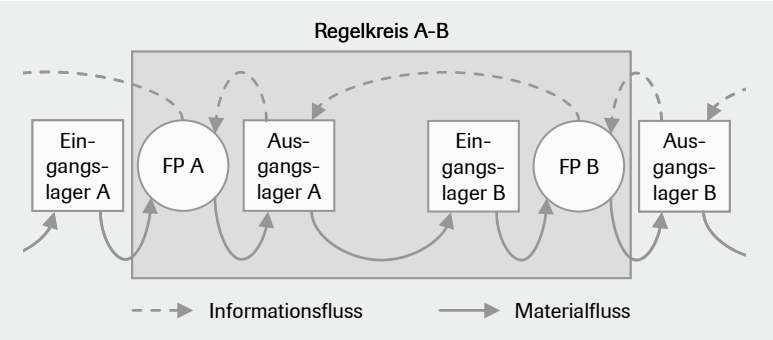


Abbildung 27: Kanban-Regelkreis bestehend aus zwei Funktionsplätzen mit jeweiligem Eingangs- und Ausgangslager

Das Materialflusssystem wird in ein Netzwerk bzw. in Ketten von solchen Regelkreisen wie in Abbildung 27 aufgeteilt. In der Regel hat ein Funktionsplatz mehrere Vorgänger bzw. mehrere Nachfolger und ist daher in mehr als zwei Regelkreisen enthalten [SCH93]. Ein Funktionsplatz ist immer Erzeuger und Verbraucher zugleich. Ein Los darf nur in dem Fall an einem Funktionsplatz B

bearbeitet werden, in welchem ein entsprechender Kanban eines Verbrauchers vorhanden ist. Teilenummer und Losgrösse sind Bestandteil des Produktionskanbans (siehe Abbildung 28).

Sind bei einem Erzeuger (inAbbildung 27 am Funktionsplatz B) mehrere Kanbans vorhanden, so wird jener mit der höchsten Priorität gewählt (in der Regel in der Reihenfolge des Zugangs, also nach FIFO-Prinzip). Alternative Reihenfolgeregelungen sind realisierbar. Für die Bearbeitung wird das entsprechende Material aus dem zum Funktionsplatz gehörenden Eingangslager entnommen. Dadurch wird eine neue Kanban-Karte frei, welche an den entsprechenden Vorgänger geleitet wird[3]. Im Beispiel gemäss Abbildung 27 ist der Funktionsplatz A der Vorgänger. Die Erzeugerstelle A wird durch den zugestellten Kanban autorisiert resp. beauftragt, das verbrauchte Los zu fertigen. Die Kanban-Karte übernimmt die Funktion des Fertigungsauftrags [WEB08]. Sollte am Funktionsplatz A das notwendige Material nicht verfügbar sein (Eingangslager A), so wird der nächstpriorisierte Kanban gefertigt (dieser kann auch von anderen Verbrauchern stammen). Gibt es keine weiteren Kanbans so wird am Funktionsplatz A nicht gearbeitet, der Funktionsplatz ist blockiert [LÖD08]. Die Blockade wird aufgehoben, falls entweder das benötigte Material geliefert wird oder ein Kanban (von einem dazugehörenden Verbraucher) eintrifft, zu welchem das zu verbauende Material vorhanden ist. Ist für eine Variante sowohl der Kanban als auch das Material verfügbar so wird die Variante gefertigt. Nach Fertigstellung des Arbeitsvorgangs am Funktionsplatz A wird der Kanban und das Los im zugehörigen Transportbehälter in das Ausgangslager des Funktionsplatzes A gestellt. Der Mitarbeiter überprüft, ob er autorisiert ist, ein weiteres Los zu bearbeiten (aufgrund eines Kanbans von einem „seiner“ Verbraucher).

Abbildung 28: Beispiel eines Kanbans (jap.: Karte) [WIE97]

Die wesentlichen Verfahrensgrössen des Kanban-Verfahrens sind die Losgrösse und die Anzahl Kanbans [LÖD08] pro Variante und Wertschöpfungsstufe. Die Losgrösse bestimmt wesentlich die Wiederbeschaffungszeit innerhalb eines Regelkreises mit. Durch die Anzahl Kanbans wird die Verfügbarkeit während dieser Wiederbeschaffungszeit weitgehend festgelegt. Mit diesen beiden Grössen ist der maximal mögliche Bestand in einem Regelkreis gemäss Abbildung 27 eindeutig definiert. Somit lässt sich auch der Maximalbestand in der gesamten Fertigung ermitteln.

Das Kanban-Verfahren eignet sich insbesondere für Serienfertiger mit begrenzten Stückzahlschwankungen und einer geringen Variantenvielfalt. Ansonsten wird der Umlaufbestand und somit auch der Flächenbedarf sehr gross. Neben dem Grundverfahren existieren eine Vielzahl von Verfahrensvarianten, wie z.B. Zwei-Karten-Kanban, Transport-Kanban, Sicht-Kanban, Behälter-

[3] Die erzeugende Stelle (Lieferant) ist Bestandteil auf dem Kanban (vgl. Abbildung 28) und somit immer eindeutig definiert und allen am Prozess Beteiligten bekannt

Kanban, Minimal Blocking, etc. Im Verständnis der Kanban-Steuerung kann ein Funktionsplatz auch eine Fertigungsinsel oder eine Produktionslinie umfassen.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 29 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Das Kanban-Verfahren ist ein Steuerungsverfahren, das die Fertigungsaufträge erzeugt (siehe Abbildung 29, 1. Merkmal). Die Entscheidung betreffend der Arbeitsvorgangsbearbeitung erfolgt zwar unter Berücksichtigung zentraler Vorgaben (Anzahl Kanbans), schlussendlich jedoch dezentral (siehe Abbildung 29, 2. Merkmal). Das Verfahren benötigt keine terminierten Arbeitsvorgänge (siehe Abbildung 29, 3. Merkmal). Im Kanban-Verfahren erfolgt die Auftragsfreigabe sofort mit der Auftragserzeugung (siehe Abbildung 29, 4. Merkmal), also bei der Entgegennahme der Kanban-Karte. Der sofortige Arbeitsbeginn kann nur durch nicht vorhandenes Material oder bereits wartende, pendente Kanbans verhindert werden. Der erste Grund sollte durch die angemessene Dimensionierung der Anzahl Kanbans möglichst ausgeschlossen werden. Der zweite Grund ist die Ausgangslage für die Priorisierung der Bearbeitungsreihenfolge nach dem FIFO-Prinzip (siehe Abbildung 29, 5. Merkmal). Im Rahmen des Kanban-Verfahrens werden keine expliziten Regelgrössen erfasst (wie z.B. Bestand, Terminabweichung, etc.). Daraus abgeleitet verfügt das Verfahren auch über keine quantitative Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung (siehe Abbildung 29, 6. und 7. Merkmal).

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	**Verfahren der Auftragserzeugung**	Verfahren der Auftragsfreigabe	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	**dezentrale Entscheidungsfindung**	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	**nein**	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	**sofort (bei Auftragserzeugung)**	nach Dringlichkeit (Termin)	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	**keine (FIFO)**	geplante	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	**keine**	periodisch (zeitgetrieben)	periodisch (ereignisorientiert)	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	**keine**	in der Planung	in der Steuerung	andere	

Abbildung 29: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Kanban-Verfahrens in der Morphologie

Erkenntnisse

Aufgrund der Einsatzvoraussetzungen des Kanban-Verfahrens eignet sich die Verwendung bei einem Variantenhersteller mit komplexen Materialflüssen und stark schwankenden Nachfragemengen gemäss der fokussierten Fertigungsstruktur (siehe Abschnitt 1.4.3) nicht [HEI02]. Das trifft auf Mengenschwankungen zu, welche die definierten Bandbreiten übersteigen. Anhand dieser Bandbreiten werden die Anzahl Kanban-Karten zur Sicherstellung der Verfügbarkeit während der Wiederbeschaffungszeit ermittelt. Mit zunehmender Anzahl Kanban-Karten nehmen Bestand und Flächenbedarf zu.

Eine grundsätzliche Charakteristik des Verfahrens stellt die dezentrale Organisation in Form von verketteten Regelkreisen dar. Daraus resultiert eine dezentrale, autonome Entscheidungskompetenz. Die Realisierung dieser Struktur erfolgt innerhalb eines klar vorgegebenen Rahmens mittels einfachen und unmissverständlichen Regelanweisungen. Eine weitere, zentrale Eigenschaft des Kanban-Verfahrens ist die Fertigung nach Bedarf. Falls sich an einem Arbeitssystem keine Kanban-Karten der verbrauchenden Stellen befinden, so ist das Arbeitssystem nicht zur Produktion autorisiert und es befindet sich in einem Wartezustand.

Die dezentrale Struktur hat zur Folge, dass nicht komplette Fertigungsaufträge (vom Rohmaterial bis zum Enderzeugnis) durch die Produktion gesteuert werden. Die Zuordnung eines einzelnen Arbeitsvorganges zu einem übergeordneten Fertigungsauftrag ist nicht möglich. Somit entspricht das Kanban-Verfahren nicht dem in Abschnitt 2.1 dargestellten Verständnisses des Fertigungsauftrags als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung.

Fazit:
- \+ Kein operativer Planungsbedarf (Planung beschränkt sich auf eine periodische Überprüfung der Anzahl Kanbans und der Losgrössen)
- \+ Keine Überproduktion, da die Bearbeitung ausschliesslich aufgrund eines Verbrauchs erfolgt (ohne Verbrauch wird eine „schlechte“ Auslastung in Kauf genommen)
- \- Kein Bezug zwischen Fertigungslos und einem gesamtheitlichen Fertigungsauftrag
- \- Keine Rückverfolgung (z.B. Chargenverfolgung) möglich
- \- Anzahl Varianten ist beschränkt, die Nachfrageschwankungen sollten eine bestimmten Bandbreite nicht überschreiten

3.4.3. Das Conwip-Verfahren

Allgemeines

Conwip ist die Abkürzung für ***Con**stant **W**ork **I**n **P**rocess*. Die Grundidee dieses Verfahrens besteht darin, den Bestand einer Fertigung resp. Fertigungslinie auf konstantem Niveau zu halten. Damit wird bezweckt, eine Systemblockade durch zuviel offenen Arbeitsvorrat zu verhindern. Das Verfahren wurde bereits zu Beginn der 80er-Jahre zur Steuerung von Fertigungslinien angewendet, allerdings noch unter anderem Namen. 1990 wurde es von Spearman, Woodruff und Hopp [SPE90] zur Steuerung mehrstufiger Produktionsprozesse unter dem einschlägigen Namen *Conwip* vorgestellt. Nach Lödding [LÖD01] eignet sich das Verfahren auch zur Steuerung von komplexeren Materialflüssen.

Verfahrensbeschreibung

Analog dem Kanban-Verfahren (siehe Abschnitt 3.4.2) funktioniert das Conwip-Verfahren mittels Karten. Im Unterschied zu Kanban wird nicht jede einzelne Produktionsstufe, sondern das gesamte Produktionssystem als Regelkreis betrachtet [HOP08a]. Ein weiterer Unterschied zum Kanban-Verfahren besteht darin, dass die Karten des Conwip-Verfahrens variantenunabhängig sind. Die Conwip-Karten beziehen sich auf den offenen Arbeitsvorrat, in einigen Fällen auch nur auf jenen am Engpasssystem [RÜC06]. Grundsätzlich kann die Arbeitsmenge in Anzahl Teile, in Anzahl Fertigungsaufträge oder in Vorgabestunden gemessen werden [LÖD08]. Im letztgenannten Fall wird das Verfahren auch als *Maximum Load Limit* bezeichnet.

Eine zentrale Planung legt die Anzahl der zirkulierenden Conwip-Karten fest. Eine Conwip-Karte begleitet den Fertigungsauftrag beim gesamten Durchlauf durch die Fertigung. Es resultiert eine

einfache Verfahrens-Regel: die Freigabe eines neuen Fertigungsauftrags darf erst dann erfolgen, wenn eine Conwip-Karte durch die Fertigstellung eines Fertigungsauftrags frei wird. Dieses Prinzip der Conwip-Steuerung ist in Abbildung 30 dargestellt. In dieser Abbildung wird zur Vereinfachung vorausgesetzt, dass alle Fertigungsaufträge dieselbe Operationsreihenfolge haben. Ist das nicht der Fall, kann dem beispielsweise derart begegnet werden, dass entlang der verschiedenen Hauptmaterialflüsse spezifische Conwip-Bestandslevels definiert werden [HOP08a]. Der Bestandslevel wird durch die Anzahl Conwip-Karten - welche durch die zentrale Planung festgelegt wird - nach oben begrenzt. Die Conwip-Karte wäre demnach nur für die Freigabe einer bestimmten „Route“ zulässig, z.B. durch verschiedene Kartenfarben auch visuell fassbar. Ein Fertigungsauftrag würde somit nur in dem Fall freigegeben, wenn eine Conwip-Karte für die entsprechende Route (mit der entsprechenden Farbe) frei wird.

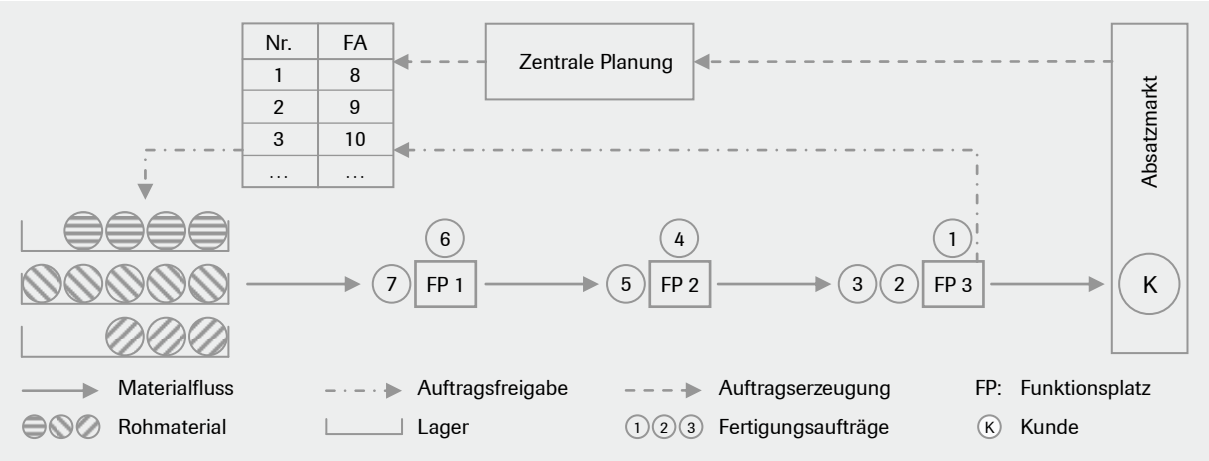


Abbildung 30: Prinzip des Conwip-Verfahrens [nach LÖD08]

Die Liste mit den Fertigungsaufträgen wird, wie in Abbildung 30 dargestellt, durch die zentrale Planung geführt und enthält alle bekannten, aber noch nicht freigegebenen Fertigungsaufträge, deren Plan-Starttermin innerhalb eines definierten Vorgriffshorizonts liegen [LÖD08]. Somit entspricht das Conwip-Verfahren auch dem in Abschnitt 2.1 dargestellten Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung. Da nicht zwangsläufig dieselbe Variante in die Fertigung eingesteuert wird wie die zuvor entnommene muss durch die zentrale Planung bestimmt werden, in welcher Reihenfolge die Varianten in die Fertigung eingelastet werden [SCH03a]. Die Festlegung dieser Reihenfolge und die Auftragsterminierung erfolgt durch ein übergeordnetes ERP-System [REI01].

Das Conwip-Verfahren bedarf zweier Verfahrensparameter: das ist zum einen die Anzahl Conwip-Karten und zum anderen die Länge des Vorgriffshorizonts. Mit der Anzahl Conwip-Karten wird der maximale Bestand im Fertigungssystem festgelegt. Somit wird über diesen Verfahrensparameter auch Einfluss auf die Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge genommen. Die Länge des Vorgriffshorizonts bestimmt die maximale Zeitdauer, um die ein Auftrag vorzeitig für die Fertigung freigegeben werden darf. Fällt der geplante Starttermin eines Fertigungsauftrags in den Vorgriffshorizont, so ist der Fertigungsauftrag ab diesem Zeitpunkt für die Freigabe mittels einer entsprechenden Conwip-Karte verfügbar.

Für die Analyse und Steuerung eines Betriebs, welcher nach dem Conwip-Verfahren funktioniert, eignet sich auch die Produktionskennlinie. Die Berechnungsgrundlagen der Produktionskennlinie für gesamte Fertigungsbereiche stellt Schneider [SCH04] dar. Mit diesem Instrument wird die Möglichkeit geschaffen, eine logistische Positionierung des gesamten Fertigungsbereichs mittels nur einer Kennlinie vorzunehmen.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 31 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Beim Conwip-Verfahren generiert ein übergeordnetes Planungsinstrument durchlaufterminierte Fertigungsaufträge. Diese werden durch die Verfahrensregeln freigegeben (siehe Abbildung 31, 1. Merkmal). Aufgrund der durch die Planung terminierten Arbeitsvorgänge erfolgt die Entscheidungsfindung zur AVG-Bearbeitung zentral (siehe Abbildung 31, 2. Merkmal). Es ist aber auch denkbar – insbesondere für weniger komplexe Materialflusssysteme – dass lediglich ein Starttermin für den Fertigungsauftrag zur Freigabeberechtigung ermittelt wird. An den Arbeitssystemen werden die Arbeitsvorgänge der Fertigungsaufträge dann nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet und die Entscheidungsfindung zur AVG-Bearbeitung erfolgt in dem Fall dezentral. Aus diesem Grund ist die Ausprägung „dezentral“ des 2. Merkmals in Abbildung 31 schraffiert dargestellt. Entsprechend fallen die Merkmalsausprägungen des 3. Kriteriums aus: grundsätzlich benötigt das Verfahren terminierte Arbeitsvorgänge. Im Falle einer FIFO-Bearbeitungsreihenfolge ist lediglich die Ermittlung des Starttermins des 1. AVG erforderlich (schraffierte Markierung). Unabhängig von der Entscheidungsfindungsweise der AVG-Bearbeitung erfolgt die Freigabe eines Fertigungsauftrags immer aufgrund einer Kombination. Die Freigabe erfordert eine terminierte Dringlichkeit (Starttermin des Fertigungsauftrags fällt in den Vorgriffshorizont) und eine entsprechende Bestandssituation in Form einer freien Conwip-Karte (siehe Abbildung 31, 4. Merkmal). Beim 5. Merkmal handelt es sich entsprechend der Arbeitsvorgangsterminierung um eine „geplante“ Auftragspriorität (im Falle der FIFO-Bearbeitungsreihenfolge entspricht die schraffiert dargestellte Ausprägung „keine“). Die Ermittlung der Regelgrössen (siehe Abbildung 31, 6. Merkmal), namentlich des Bestands, erfolgt durch das Ereignis der Fertigstellung eines Fertigungsauftrags und der dadurch freiwerdenden Conwip-Karte. Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung (siehe Abbildung 31, 7. Merkmal) sind durch das Steuerungsverfahren selber keine gegeben.

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	**zentrale Entscheidungsfindung**	*dezentrale Entscheidungsfindung*	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	**ja**	nein	*nur Starttermin des 1. AVG*	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	**bestandsbedingt**	andere
5.	Auftragspriorität	*keine (FIFO)*	**geplante**	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	**in der Planung**	in der Steuerung	andere	

Abbildung 31: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Conwip-Verfahrens in der Morphologie

Erkenntnisse

Im Unterschied zum Kanban-Verfahren wird beim Conwip-Verfahren das Einsatzgebiet durch eine steigende Anzahl Varianten *nicht* eingeschränkt. Beim Kanban-Verfahren nimmt der Bestand mit jeder Artikelnummer und mit zunehmender Fertigungstiefe zu, da die Anzahl der kreislaufspezifi-

schen Puffer steigt. Das Conwip-Verfahren wirkt diesem Effekt entgegen, indem das gesamte Fertigungssystem als Kreislauf betrachtet wird und keine variantenspezifischen Pufferlager notwendig sind [KOE08]. Wenn die Marktnachfrage (der Fertigungsabfluss) vorübergehend ausbleibt ergibt sich der Bestand beim Kanban-Verfahren aus der Multiplikation von Anzahl Kanbans und Losgrösse. Beim Conwip-Verfahren läuft die Fertigung leer (auf den Bestand Null), falls die Planung auf die Situation reagiert und keine Fertigungsaufträge mehr generiert. Diese Unterschiede sind in der Abbildung 32 ersichtlich, in welcher die Funktionsprinzipien von Conwip und Kanban gegenübergestellt werden. Hopp [HOP08a] ergänzte die Abbildung mit dem Funktionsprinzip des MRPII, das im Unterschied zum Kanban ein reines Push-Verfahren ist. Diesen Unterschied erkennt man u.a. daran, dass der Verlauf des Autorisierungssignals nicht entgegen dem Materialfluss verläuft und zu geschlossenen Regelkreisen schliesst.

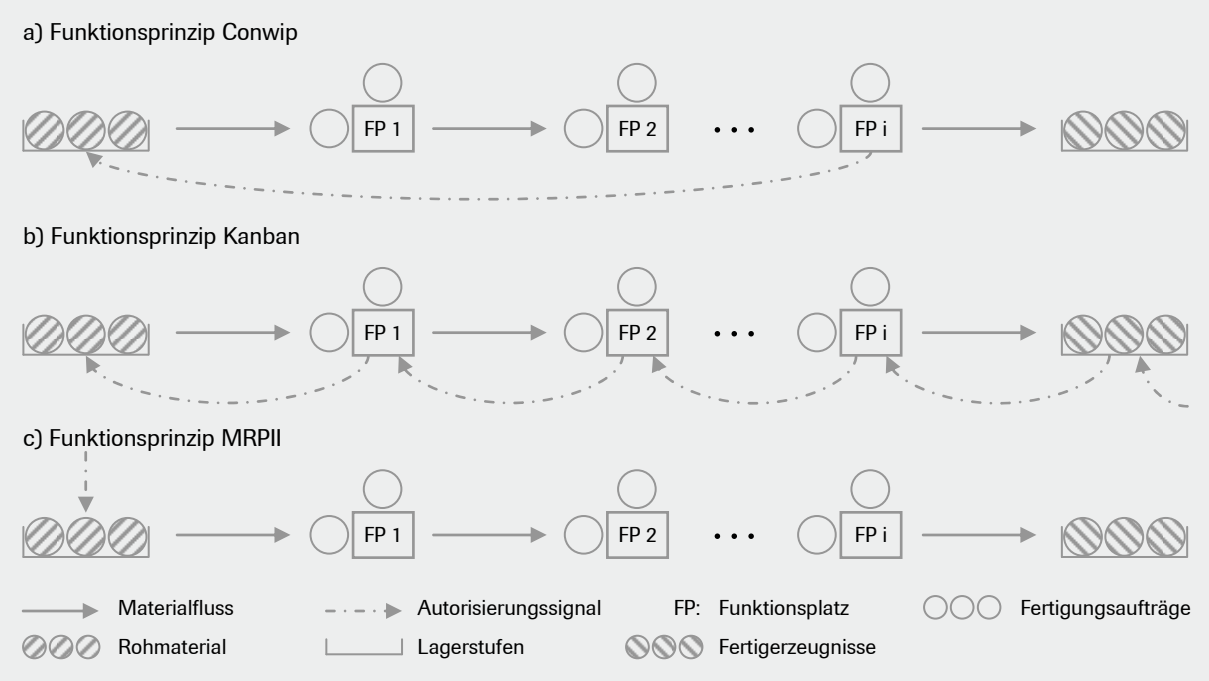


Abbildung 32: Vergleich der Funktionsprinzipien von Conwip, Kanban und MRPII [nach HOP08a]

Denkbar ist auch ein paralleler Einsatz von Conwip- und Kanban-Steuerung [PAW07]: die Conwip-Steuerung regelt die Fertigung der B- und C-Artikel mittels einer kleinen Anzahl Regelkreise, die Kanban-Steuerung wird für die Fertigung der „Renner“ (A-Artikel) eingesetzt. Somit wäre bei den A-Artikeln eine hohe Verfügbarkeit durch Lagerabrufe sichergestellt und die verbrauchsgesteuerte Nachfertigung – aufgrund der hohen Lagerhaltungsebene - relativ schnell durchgeführt.

Fazit:
- \+ Einsatz auch bei grosser Variantenvielfalt möglich
- \+ Keine Systemblockade durch zu hohe Bestände dank dem Einsatz der Conwip-Karten
- \- Zentrale Durchlaufterminierung berücksichtigt den Systemzustand (Bestand) nicht
- \- Das Verfahren verfügt über keine „echte“ Auftragspriorisierung (die entweder geplant ist oder den Regeln des FIFO-Prinzipes folgt)

3.4.4. Das OPT-Verfahren

Allgemeines

Das Optimized Production Technology-Verfahren (OPT) ist auch als „Theory of Constraints“ (engl.: Theorie der Restriktionen) bekannt und wurde massgeblich durch E. M. Goldratt Ende der 70er-

Jahre respektive zu Beginn der 80er-Jahre entwickelt. Die Grundideen und Hauptprinzipien der OPT für die Fertigung sind im Roman „The Goal“ beschrieben [GOL84]. Im Jahre 1982 wurde das Konzept als Produktionsplanungs- und Steuerungsinstrument auf dem amerikanischen Markt eingeführt [ZIS07]. Gewisse Teile des OPT-Verfahrens sind nicht veröffentlicht worden [WIE97].

Verfahrensbeschreibung

Analog wie beim MRPII-Verfahren handelt es sich bei OPT um ein Planungsverfahren, bei welchem die Steuerung auf die Terminüberwachungsfunktion reduziert wird. Die Hauptüberlegung der OPT besteht in der Annahme, dass es in jeder Fertigung einen Engpass gibt, welcher den Durchsatz der gesamten Fertigung begrenzt [LÖD08]. Aus diesem Grund gilt es diesen Engpass möglichst vollständig auszunutzen. Im Unterschied dazu sind Nicht-Engpässe nicht durchsatzbestimmend und daher auch nicht erfolgskritisch. Sie werden im Rahmen der Planung als zweite Priorität behandelt und an den durchsatzbestimmenden Engpässen ausgerichtet.

Der Erfolg eines produzierenden Unternehmens liegt in der Wirtschaftlichkeit. Goldratt [GOL08] definiert in seinem Roman dazu drei Kennzahlen:

- Durchsatz: Durchsatz ist die Geldmenge pro Zeitperiode, die das Unternehmen durch Verkäufe (Absatz) erwirtschaftet.
- Bestände: Bestände misst Goldratt ebenfalls in Geld.
- Betriebskosten: Unter Betriebskosten werden Ausgaben verstanden, die notwendig sind um Bestände in den Durchsatz umzuwandeln.

Daraus lassen sich nach Ziser [ZIS07] drei Zielsetzungen ableiten, die das OPT-Verfahren verfolgt:

- Erhöhung des Durchsatzes
- Senkung der Zwischen- und Endlagerbestände
- Senkung der Kosten für durchsatzerhöhende und bestandsverringernde Massnahmen

1. Der Materialfluss ist abzugleichen, nicht die Kapazität.
2. Der Nutzungsgrad einer Nicht-Engpasskapazität wird nicht durch diese Kapazität bestimmt, sondern durch irgendeine andere Begrenzung im Gesamtablauf.
3. Bereitstellung und Nutzung einer Kapazität sind nicht gleichbedeutend.
4. Eine in einem Engpass verlorene Stunde ist eine für das gesamte System verlorene Stunde.
5. Eine Stunde an einem Nicht-Engpass zu gewinnen ist bedeutungslos.
6. Engpässe bestimmen sowohl die Durchlaufzeit als auch die Bestände.
7. Das Transportlos soll nicht gleich dem Verarbeitungslos sein und darf das in vielen Fällen auch nicht.
8. Die Produktionslosgrösse sollte variabel und flexibel sein.
9. Die Kapazitätsbelegung und Auftragsreihenfolge sollen gleichzeitig und nicht nacheinander betrachtet werden. Durchlaufzeiten sind das Ergebnis der Planung und können nicht im Voraus festgelegt werden.

Abbildung 33: Planungsregeln des OPT-Verfahrens [WIE97]

Zur Verfolgung der drei Ziele stellen die Autoren der OPT neun Planungsregeln auf, welche in der Abbildung 33 zusammengestellt sind. Der OPT-Algorithmus wird durch fünf Module abgewickelt, deren Arbeitsweise (soweit bekannt und veröffentlicht) vorgestellt wird [COR04]:

- BUILDNET Das Modul bereitet die Daten aus Stücklisten, Arbeitsplänen, Betriebsmitteln, Lagerbeständen und Primärbedarfen auf, verwaltet sie und erstellt daraus ein Produktionsnetz, indem Arbeitsvorgänge als eigenständige Operationen dargestellt werden.

- OPT/SERVE Dieses Modul erfasst die Produktionssituation und identifiziert die Engpässe anhand der Belastungsprofile der einzelnen Arbeitssysteme.
- SPLIT Mit dem Modul SPLIT werden kritische von nichtkritischen Operationen (Arbeitsvorgängen) getrennt. Das Resultat ist die Aufteilung des Produktionsnetzes in einen kritischen und einen nichtkritischen Teil.
- OPT Das Modul plant die kritischen Arbeitssysteme (Engpass-Operationen) mittels einer Vorwärtsterminierung.
- SERVE Das Modul plant – unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Planung durch das Modul OPT – die nichtkritischen Arbeitssysteme mittels einer Rückwärtsterminierung.

Der Grund für eine Rückwärtsterminierung der nichtkritischen Fertigungsaufträge besteht darin, allfällige Auswirkungen auf vorangegangene Arbeitsvorgänge zu ermitteln. Bei erneutem Identifizieren von Engpässen wird der Algorithmus solange wiederholt bis kein neuer Engpass mehr festgestellt werden kann [SCH05]. Die Hauptcharakteristik der OPT besteht darin, den Produktionsprozess sowohl mengen- als auch zeitmässig gezielt auf die Engpässe einzusteuern. Dies erfolgt durch eine progressive Planung des kritischen Teils des Produktionsnetzes und einer retrograden Planung des nichtkritischen Teils.

Das Ergebnis des OPT-Algorithmus ist ein vollständiger Produktionsplan mit sämtlichen Informationen betreffend Losgrösse, Planstart und –ende der einzelnen Arbeitsgänge sowie Bearbeitungszeiten. Somit ist auch beim OPT-Verfahren das Verständnis der Auftragsliste als Scharnier zwischen Planung und Steuerung gemäss Abbildung 4 gegeben.

Die Philosophie der OPT wird oft auch als *Drum-Buffer-Rope-Ansatz* bezeichnet [WIE05]. Danach gibt der Engpass den Produktionstakt vor (engl. Drum: Trommel). Ein Sicherheitsbestand in Form eines Puffers (engl. Buffer: Puffer) vor dem Engpass sorgt für die verfolgte Auslastungssicherheit. Dieser Puffer entspricht der Warteschlange eines Arbeitssystems nach Abbildung 8. Darüber hinaus ist eine Informationsverbindung zwischen dem Engpass-Arbeitssystem und den Arbeitssystemen notwendig, welche den Engpass mit Fertigungsaufträgen versorgen (also den Vorgängern). Diese Verbindung wird mit Rope (engl.: Seil) bezeichnet und ermöglicht es, bei überhöhtem Bestand im Puffer die Produktion der Vorgänger zu drosseln resp. bei Gefahr eines Leerlaufens des Puffers diese zu steigern.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Merkmalsausprägungen des OPT-Verfahrens im morphologischen Schema entsprechen denjenigen des MRPII-Verfahrens (siehe Abbildung 26) und werden an dieser Stelle nicht wiederholt. Die Ermittlung der Regelgrössen erfolgt ebenfalls periodisch beim Durchlauf der Planung (siehe das 6. Merkmal in Abbildung 26). Die Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung sind analog in der Planung gegeben (siehe Abbildung 26, 7. Merkmal). Diese sind im Falle des OPT-Verfahrens sehr ausgeprägt, da die Identifikation der Engpass-Arbeitssysteme einen zentralen Bestandteil des Planungsalgorithmus darstellt.

Erkenntnisse

Aus der Entwicklung der OPT-Verfahrensregeln stammt das Zitat „die Summe der Einzeloptima ist nicht gleich der Summe des Gesamtoptimums“ [PAW07]. Der Inhalt des Zitats in Kombination mit der fünften Planungsregel in Abbildung 33 sagt aus, dass die Auslastungsoptimierung an Nicht-

Engpässen für das Gesamtsystem Fertigung keine positive Wirkung zeigt. Wenn an einem Nicht-Engpass nicht dringende Fertigungsaufträge bearbeitet werden, so hat das für das Gesamtsystem in dem Sinne einen negativen Effekt, dass nichtdringende Fertigungsaufträge in den darauffolgenden Arbeitsvorgängen an Engpässe gelangen und sich dadurch der Umlaufbestand in der Fertigung erhöht. Diese Überlegung führt zur Schlussfolgerung, dass die Maximierung der Leistung ausschliesslich an den Engpass-Arbeitssystemen sinnvoll ist. An den Nicht-Engpässen ist die Leistung und somit auch die Auslastung ein Ergebnis.

Nach Enns und Costa [ENN02] sind die Vorteile einer Engpass-Steuerung hinsichtlich der Zielgrössen der Fertigung (vgl. Abschnitt 2.3) umso grösser, je eindeutiger der Engpass definiert und je komplexer der Materialfluss ist. Nach Gilland [GIL02] erzielt die Engpass-Fokussierung bei vergleichbarem Bestand eine höhere Leistung als die Conwip-Steuerung (vgl. Abschnitt 3.4.3), wenn ebenfalls eindeutige Engpass-Arbeitssysteme vorhanden sind.

Die bewusste Steuerung der Engpässe ist also dann wirkungsvoll, wenn eindeutig bestimmbare Engpass-Arbeitssysteme vorhanden sind. Das setzt die Fähigkeit voraus, die echten Engpass-Arbeitssysteme identifizieren zu können. Arbeitssysteme können mitunter aufgrund einer zunehmenden Nachfrage, welche sich in der Fertigungsauftragsliste abbildet, zu Engpässen werden (und umgekehrt). Ausserdem beinhaltet die Beschreibung des Drum-Buffer-Rope-Ansatzes zusätzlich zu den Steuerungskomponenten Regelelemente in Form des *Seils (rope).* Dieses drosselt oder steigert die Produktion der Vorgänger-Arbeitssysteme. Mit dieser Regelung soll sichergestellt werden, dass sich am Engpass sowohl kein Materialflussabriss als auch keine unkontrollierte Bestandszunahme ereignet.

Fazit:
- +/- Grösserer Planungsumfang als das MRPII-Verfahren (Engpassidentifikation, etc.)
- +/- Regelungstechnisches Gedankengut im Ablauf berücksichtigt (+), die Umsetzung erfolgt allerdings primär im Planungsteil und somit nicht im kurzfristigen Zeithorizont (-)
- \+ Erkenntnis: Auslastungsmaximierung aller Arbeitssysteme wirkt kontraproduktiv
- \- Identifikation der Engpässe kann nur bei einem Planungsdurchlauf erfolgen

3.4.5. Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe

Allgemeines

Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) geht auf Bechte [BEC84] zurück, der dieses Verfahren erstmals zu Beginn der 80er-Jahre am IFA der Universität Hannover vorstellte. Neben der Dissertation von Bechte ist auch die Darstellung der BOA bei Wiendahl [WIE97] wohl eine der meistzitierten Quellen für dieses Verfahren.

Verfahrensbeschreibung

Die BOA setzt – analog zum MRPII- und OPT-Verfahren – einen Planungsüberbau voraus, welcher Fertigungsaufträge generiert und terminiert. Diese Terminierung erfolgt jeweils ab geplantem Endtermin rückwärts (Rückwärtsterminierung), womit der geplante Starttermin des Fertigungsauftrags bestimmt wird. Die Terminierung der einzelnen Arbeitsvorgänge ist nicht notwendig. Die so erzeugten Fertigungsaufträge werden in einer Liste gesammelt – entsprechend dem in Abbildung 4 dargestellten Verständnis der Auftragsliste als Scharnier zwischen Planung und Steuerung.

Wenn man in einem Fertigungsbereich sämtliche Arbeitssysteme durch ein Trichtermodell (vgl. Abschnitt 2.4.2) ersetzt, resultiert die Darstellung eines produktionstechnischen Systems analog

der Abbildung 34. Das Verfahren der BOA sieht für jeden Trichter in Abbildung 34 ein Bestandskonto sowie eine Belastungsschranke vor. Bei Freigabe eines Fertigungsauftrags durch die Steuerung werden alle Vorgabezeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge in die entsprechenden Bestandskonten eingebucht und nach Bearbeitung wieder ausgebucht. Befindet sich der Fertigungsauftrag im Bestand eines Arbeitssystems (direkter Bestand), so wird seine Vorgabezeit vollständig für das Bestandskonto berücksichtigt. Bei Arbeitssystemen, welche der Fertigungsauftrag in Zukunft durchlaufen wird (indirekter Bestand), wird die Vorgabezeit im Bestandskonto reduziert berücksichtigt. Diese Reduktion erfolgt mittels eines Abzinsungsfaktors, der umso kleiner wird, je weiter der voraussichtliche Bestandszugang in der Zukunft liegt. Überschreitet der Bestand im Bestandskonto eines Arbeitssystems die Bestandsgrenze, so blockiert das BOA-Verfahren die Freigabe aller Fertigungsaufträge, welche das betreffende Arbeitssystem durchlaufen würden.

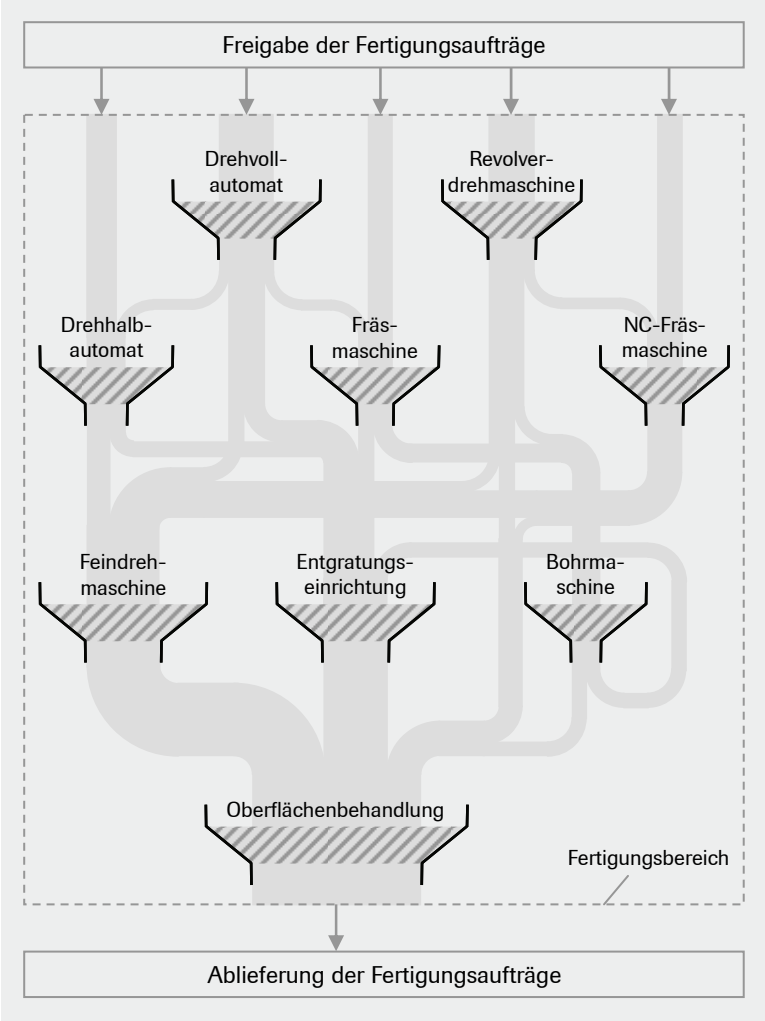


Abbildung 34: Beispielhafte Fertigung, in welcher jedes Arbeitssystem als Trichter verstanden wird [BEC84]

Bechte [BEC84] schlägt eine periodische Freigabe der Fertigungsaufträge vor. Nach Lödding eignet sich die BOA grundsätzlich auch für eine ereignisorientierte Auftragsfreigabe [LÖD08]. In beiden Varianten berücksichtigt die BOA für die Prüfung der Fertigungsauftragsfreigabe nur jene Fertigungsaufträge aus der Auftragsliste, deren geplanter Starttermin innerhalb eines definierten Vorgriffshorizonts liegt. Weiter verzichtet das Verfahren explizit auf einen Maschinenbelegungsplan wie in Abbildung 25 [SCH93] und substituiert diesen durch Führung der eben beschriebenen Bestandskonten pro Arbeitssystem. Dazu empfiehlt Wiendahl die Abfertigung der Fertigungsaufträge nach der FIFO-Regel, da sie zu den geringsten Durchlaufzeit-Streuungen führt [WIE87].

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 35 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Die BOA ist, wie der Name bereits sagt, ein Verfahren der Auftragsfreigabe (siehe Abbildung 35, 1. Merkmal). Die Entscheidungsfindung betreffend der AVG-Bearbeitung erfolgt dezentral (2. Merkmal). Die Freigabe der Fertigungsaufträge erfolgt aufgrund einer terminierten Dringlichkeit (der Starttermin fällt in den Vorgriffshorizont) und aufgrund der Bestandssituation der jeweils ersten Arbeitssysteme. Aus diesem Grund sind in Abbildung 35 beim 4. Merkmal entsprechend zwei Ausprägungen markiert. Das Verfahren benötigt zwar keine terminierten Arbeitsvorgänge, den Starttermin des 1. AVG allerdings schon (3. Merkmal). Nach der Freigabe der Fertigungsaufträge verfügt der Fertigungsauftrag über keine Priorität mehr und wird nach dem FIFO-Prinzip weiterbearbeitet (siehe Abbildung 35, 5. Merkmal). Die Ermittlung der Regelgrösse Bestand (siehe Abbildung 35, 6. Merkmal) erfolgt ereignisorientiert durch Zu- und Abbuchung der direkten und indirekten Vorgabezeiten. Die Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung sind direkt in der Steuerung angelegt (siehe Abbildung 35, 7. Merkmal), da sie jeweils die Auftragsfreigabe infolge eines oder mehrerer voller Belastungskontos verhindert.

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	**dezentrale Entscheidungsfindung**	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	nein	**nur Starttermin des 1. AVG**	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	**bestandsbedingt**	andere
5.	Auftragspriorität	**keine (FIFO)**	geplante	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	**in der Steuerung**	andere	

Abbildung 35: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten der BOA in der Morphologie

Erkenntnisse

Die Einführung der Belastungskonten pro Arbeitssystem schafft die Voraussetzungen hinsichtlich der Verwendung des Bestands als effektive Regelgrösse (vgl. Abschnitt 2.4.3 und 2.5.1). Im Rahmen der belastungsorientierten Auftragsfreigabe wirkt die Belastungsschranke restriktiv, um nicht zu viele Fertigungsaufträge auszulösen. Somit beinhaltet das Verfahren eine Bestandslimitierung und durchbricht damit den Fehlerkreis der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 2.3.6). Die vorgegebene Bestandsgrenze ist ein durch die Planung festgelegter Wert. Es ist somit ein statischer Wert, der regelmässig überprüft und evtl. angepasst werden muss.

Fazit:
- \+ Instrument „Belastungskonto“ als Voraussetzungen einer Kapazitätssteuerung
- \+ Definition eines Maximalbestands pro Arbeitssystem
- \- Eine Führungsgrösse im regelungstechnischen Verständnis fehlt
- \- Eilaufträge können aufgrund des FIFO-Prinzips nicht beschleunigt werden

3.4.6. Das Bestellbestands-Verfahren

Allgemeines

Das Bestellbestandsverfahren ist gleichzeitig eines der ältesten als auch eines der verbreitetsten Verfahren in der Beschaffungs- und Produktionslogistik [LÖD08]. Das Verfahren ist auch bekannt unter den Namen Bestellpunktverfahren oder bestandsorientierte Bedarfsermittlung. Das Verfahren regelt die Lagerbestände und wird sowohl von Produktions- wie auch von Handelsunternehmen in Beschaffungs-, Halbfertigerzeugnisse- und Fertigwarenlagern angewendet. Es wird oft auch unternehmensübergreifend eingesetzt.

Verfahrensbeschreibung

Das Bestellbestandsverfahren wird jeweils auf eine einzelne Artikelnummer angewendet. Das Verfahren erzeugt einen Fertigungsauftrag, sobald durch die Lagerabgänge ein definierter Lagerbestand der Artikelnummer erreicht oder unterschritten wird. Diesen Lagerbestand nennt man Bestellpunkt. Der Bestellpunkt wird optimalerweise so gewählt, dass ein ausgelöster Fertigungsauftrag ungefähr zu dem Zeitpunkt eintrifft, an welchem der Lagerbestand auf den Sicherheitsbestand trifft. Die Ermittlung des Bestellpunkts B_{Order} lautet also:

$$B_{Order} = (\kappa_{NF} \cdot d_{Besch}) + B_S \tag{3.1}$$

mit κ_{NF} Verbrauchs- resp. Nachfragerate [Stk. / BKT]

d_{Besch} Wiederbeschaffungsdauer [BKT]

B_S Sicherheitsbestand [Stk.]

Um Lagerdefizite zu vermeiden wird in (3.1) zusätzlich ein Sicherheitsbestand geführt. Die Höhe des Sicherheitsbestands wird im Wesentlichen durch die Nachfragerate und die Dauer der Wiederbeschaffung selber bestimmt [JÖH67]. Sollte die Nachfrage vorübergehend reduziert sein oder die Beschaffung erfolgt rascher als vorgesehen, so resultiert ein höherer Lagerbestand als vorgesehen. Diese Bestandsabweichung regelt sich autonom dadurch, dass die Dauer bis zum erneuten Erreichen des Bestellpunkts länger sein wird. Das eben beschriebene Grundprinzip des Bestellbestands-Verfahren ist in Abbildung 36 dargestellt. Bei einer kontinuierlichen und konstanten Nachfragerate stellt der Bestandsverlauf eine für das Bestellbestandsverfahren charakteristische Sägezahnkurve dar.

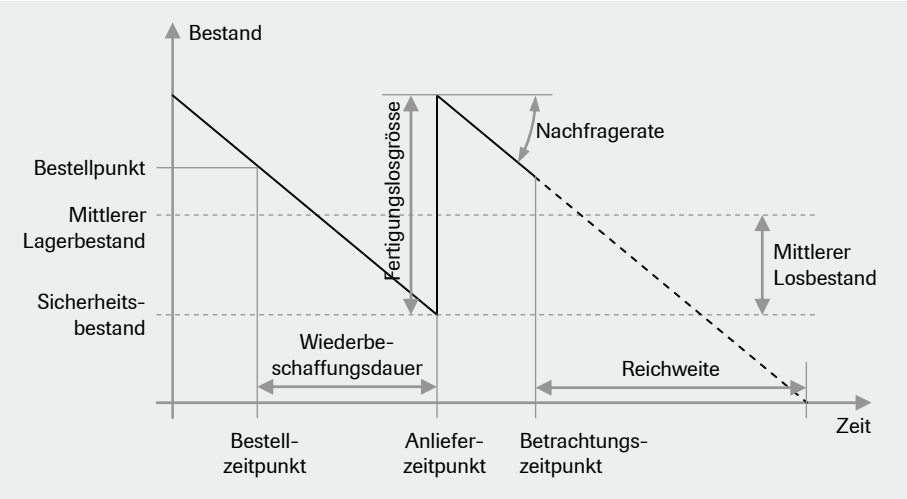


Abbildung 36: Die für das Bestellbestands-Verfahren charakteristische Sägezahnkurve des Lagerbestands

Neben dem Bestellpunkt, welcher den Bestellbestand definiert, bilden der Sicherheitsbestand sowie die Fertigungslosgrösse die wesentlichen Verfahrensparameter. Die Losgrösse des ausgelösten Fertigungsauftrags ist im Grundverfahren konstant [LÖD08]. Die in Abbildung 36 dargestellte Sägezahnkurve eignet sich, um den Einfluss der Losgrösse auf die sich ergebende Auslösefrequenz der Fertigungsaufträge sowie auf die Bestandsfläche graphisch darzustellen.

Neben dem Grundverfahren existieren nach Färber [FÄR07] zusätzliche Verfahrensvarianten, die sich primär in der Bestellpolitik unterscheiden. Unterschiedliche Bestellpolitiken ergeben sich entlang der Dimensionen Zeit (Zeitpunkt der Bestellung) und Menge (Umfang der Bestellung). In der Dimension Zeit kann der Zeitpunkt der Bestellung entweder fix (t) oder variabel (s) ausgelegt werden. In der Dimension Menge kann eine feste Bestellmenge (q) von einer variablen Bestellmenge (S) unterschieden werden. Die resultierenden vier Bestellpolitiken sind in Abbildung 37 zusammengefasst und werden im Folgenden kurz beschrieben.

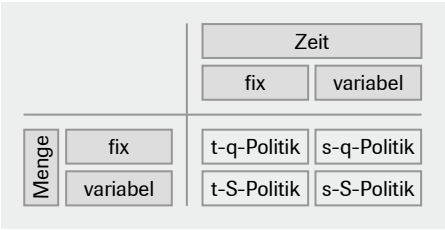


Abbildung 37: Bestellpolitiken des Bestellbestandsverfahren [FÄR07]

„s-q-Politik“: Das oben beschriebene Grundverfahren verfügt über eine feste Losgrösse des ausgelösten Fertigungsauftrags. Die Menge ist also fix (q). Der Bestellzeitpunkt ist ein Ereignis (und somit variabel), das sich durch Bestandsabbau aufgrund von Nachfragen ergibt. Somit entspricht in Abbildung 37 die „s-q-Politik“ dem Grundverfahren.

„t-S-Politik“: Die Verfahrensvariante „t-S-Politik“ zeichnet sich durch einen fixierten Bestellzeitpunkt aus (t). Die Bestellmenge ist variabel (S) und wird durch eine feste, maximale Bestandshöhe durch Differenzbildung ermittelt. Die Losgrösse des Fertigungsauftrags ist demnach ein Ergebnis des effektiven Verbrauchs in der letzten Periode. Durch die periodische, regelmässige Bestellausführung wird diese Politik auch als Bestellrhythmusverfahren bezeichnet.

„s-S-Politik“: Die „s-S-Politik“ kann als Bestellbestandsverfahren mit variabler Losgrösse bezeichnet werden [LÖD08]. Sie kombiniert Elemente des konventionellen Grundverfahrens mit Elementen des Bestellrhythmusverfahrens. Bei Erreichen des definierten Bestellbestands wird im Unterschied zum Grundverfahren keine feste Losgrösse, sondern eine durch Differenzbildung ermittelte und somit variable Losgrösse beauftragt. Sowohl Bestellzeitpunkt als auch –menge sind ein direktes Ergebnis des Verbrauchs.

„t-q-Politik“: Die verbleibende „t-q-Politik“ mit festem Auslösezeitpunkt sowie fester Losgrösse kann höchstens bei besonders konstanter Nachfrage eingesetzt werden [FÄR07]. Das ist z.B. bei Vorliegen eines Rahmenvertrags mit fest vereinbarten Abnahmemengen und –zeitpunkten der Fall. Der Vorteil dieser Verfahrensvariante besteht darin, dass der Auslösezeitpunkt bekannt ist und im Vorfeld entsprechend geplant werden kann. Der Nachteil ist, dass aufgrund einer Überbestimmung (gemäss Abbildung 37 sind zwei von zwei Freiheitsgraden bestimmt) der selbstregulierende Charakter des Verfahrens verloren geht. Im Unterschied zu den anderen drei Verfahren ist die „t-q-Politik“ kein verbrauchs- resp. bestandsgesteuertes Verfahren.

Das Bestellbestandsverfahren erfordert wenig Aufwand. Beim Einsatz des Grundverfahrens („s-q-Politik“) ist zum Anlieferzeitpunkt die zusätzliche Prüfung empfehlenswert, ob der effektive Lagerbestand grösser als der Bestellbestand ist. Sollte der soeben erhöhte Lagerbestand kleiner als der Bestellbestand sein (z.B. durch eine erhöhte Nachfrage während der Wiederbeschaffung) und der Umstand wird nicht festgestellt, so wird das Lager leerlaufen. Beim Bestellrhythmusverfahren („t-S-Politik“) ist diese Prüfung nicht notwendig. Das Bestellbestands-Verfahren funktioniert gut bei regelmässigen Bedarfsmengen und definierten Wiederbeschaffungszeiten [KOE08]. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, so müssen entsprechende Sicherheitsbestände eingeplant werden.

Darstellung im morphologischen Schema

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	**Verfahren der Auftragserzeugung**	Verfahren der Auftragsfreigabe	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	**dezentrale Entscheidungsfindung**	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	**nein**	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	**sofort (bei Auftragserzeugung)**	nach Dringlichkeit (Termin)	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	**keine (FIFO)**	geplante	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	**keine**	in der Planung	in der Steuerung	andere	

Abbildung 38: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Bestellbestands-Verfahrens in der Morphologie

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 38 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Es handelt sich um ein auftragserzeugendes Verfahren (siehe Abbildung 38, 1. Merkmal). Betreffend der Umsetzung der generierten Fertigungsaufträge werden in der Literatur keine Angaben gemacht. Eine mögliche Lösung besteht darin, dass die erzeugten Fertigungsaufträge an den Arbeitssystemen nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet werden (siehe Abbildung 38, 2. und 3. Merkmal). Die Auftragsfreigabe ist klar geregelt – sie erfolgt direkt mit der Erzeugung (siehe Abbildung 38, 4. Merkmal). Die Auftragspriorität ergibt sich aufgrund der Erzeugungsreihenfolge. Ab diesem Zeitpunkt gilt das FIFO-Prinzip (siehe Abbildung 38, 5. Merkmal). Die verwendete Regelgrösse ist der Lagerbestand. Beim Grundverfahren wird bei jedem Ereignis „Lagerabgang“ geprüft, ob der Bestand den Bestellpunkt erreicht oder unterschritten hat (siehe Abbildung 38, 6. Merkmal). Beim Bestellrhythmusverfahren wird die Regelgrösse Lagerbestand nach Ablauf der Zeitperiode ermittelt. Deshalb ist beim 6. Merkmal in Abbildung 38 zusätzlich die Ausprägung „periodisch (zeitgetrieben)“ schraffiert. Betreffend einer Kapazitätssteuerung sind beim Bestellbestandverfahren keine Voraussetzungen gegeben, da die Artikel unabhängig voneinander aufgrund des effektiven Verbrauchs gesteuert werden (siehe Abbildung 38, 7. Merkmal).

Erkenntnisse

Das Bestellbestandsverfahren liefert, trotz seiner weiten Verbreitung, häufig unbefriedigende Ergebnisse hinsichtlich der Zielgrössen der Fertigung [LÖD08]. Eine wesentliche Ursache dafür liegt darin, dass das Verfahren zwar den Bestand regelt, jedoch im Lager und nicht in der Fertigung. Bei einem gleichzeitigen Abruf verschiedener Artikel werden entsprechend Fertigungsaufträge ausgelöst und der Bestand in der Fertigung nimmt zu. Dadurch resultieren lange Durchlaufzeiten und somit auch eine schlechte Termintreue. Da jede Artikelnummer an Lager geführt wird bedeutet dies für einen Variantenfertiger ausserdem einen relativ hohen Lagerbestand an Fertigerzeugnissen. Deshalb lohnt sich in der Regel eine Prüfung, lediglich einen Teil des Sortiments nach den Regeln des Bestellbestands-Verfahren zu steuern (z.B. die A-Artikel ‚Renner-Teile' nach dem Bestellbestands-Verfahren und die B- und C-Artikel auf Kundenauftrag zu fertigen).

Fazit:
- \+ Einfaches und robustes Verfahren (im Grundverfahren Zusatzprüfung notwendig)
- \+ Aus der charakteristische Sägezahnkurve kann viel Information heraus gelesen werden (Einfluss unterschiedlicher Losgrössen, mittlerer Bestand, etc.)
- \- Bei Variantenvielfalt resultiert ein entsprechend grosser Bestand
- \- Das Verfahren verwendet keine Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (siehe Verständnis Abbildung 4)

3.4.7. Das Fortschrittszahlen-Verfahren

Allgemeines

Das Fortschrittszahlen-Verfahren wird seit Jahrzehnten in der Automobilindustrie angewendet [LÖD08]. Das Verfahren synchronisiert die Produktion in sich sowie auch die Produktion mit den Lieferanten, je nach Abgrenzung des Einsatzgebiets. Zunehmend wird das Verfahren auch bei den Zulieferunternehmen der Automobilindustrie selber eingesetzt [WIE05]. Durch die Diskussion um das Supply Chain Management erhält das Verfahren Auftrieb, da es sich gut eignet, die Produktionsprogrammplanung in Liefernetzwerken zu koordinieren. Das Verfahren kann wesentlich zur Vermeidung bzw. zur Verringerung des Bullwhip-Effekts[4] beitragen [LÖD08]. Das Fortschrittszahlen-Verfahren eignet sich besonders für den Einsatz in Unternehmen, in denen eine Serienfertigung von Standardprodukten mit sehr vielen Varianten vorliegt [WIE96].

Verfahrensbeschreibung

Insbesondere im Bereich der Fertigungssteuerung ist die Fortschrittszahlensteuerung nicht implizit algorithmisiert. Sie trifft z.B. keine Anweisungen, wann ein Auftrag zu erzeugen oder freizugeben ist. Dies hängt vielmehr von der jeweiligen Spezifizierung des Verfahrens durch den Anwender ab. Dadurch gewinnt das Fortschrittszahlenverfahren auf der einen Seite an Flexibilität hinsichtlich des Einsatzgebiets. Auf der anderen Seite erschwert es eine allgemeinte Bewertung des Verfahrens, da die schlussendliche Funktionsweise und Effektivität des Verfahrens stark von der Ausgestaltung abhängt [LÖD08]. Durch die hohe Einsatzflexibilität kann das Fortschrittszahlen-Verfahren gut mit anderen Verfahren kombiniert werden.

[4] Der Bullwhip-Effekt (engl.: Peitscheneffekt) stellt ein zentrales Problem des Supply Chain Managements dar, das sich aus dynamischen Prozessen der Lieferketten ergibt. Er beschreibt, dass die unterschiedlichen Bedarfsverläufe bzw. kleine Veränderungen der Endkundennachfrage zu Schwankungen der Bestellmengen führen, die sich entlang der logistischen Kette wie ein Peitschenhieb aufschaukeln können.

Begrifflich wird unter der Fortschrittszahl (FZ) die kumulative Erfassung und Abbildung von (Material-) Bewegungen über der Zeit verstanden. Dazu ist es notwendig, die Fertigung oder die gesamte Lieferkette in Kontrollblöcke aufzuteilen [LÖD08]. Die Grösse eines Kontrollblocks ist frei wählbar: er kann ein Arbeitssystem, ein Lager, eine Kostenstelle, ein Fertigungsbereich oder ein ganzes Unternehmen umfassen. Eine hierarchisch strukturierte Gliederung der Unternehmensprozesse ermöglicht die Definition von Subsystemen und damit die beliebig feine Aufsplittung der Kontrollblöcke in mehrere Hierarchieebenen [SCH08]. Entscheidend für die Abgrenzung sind notwendige sowie wirtschaftlich und organisatorisch realisierbare Detaillierungsgrade [SCH05].

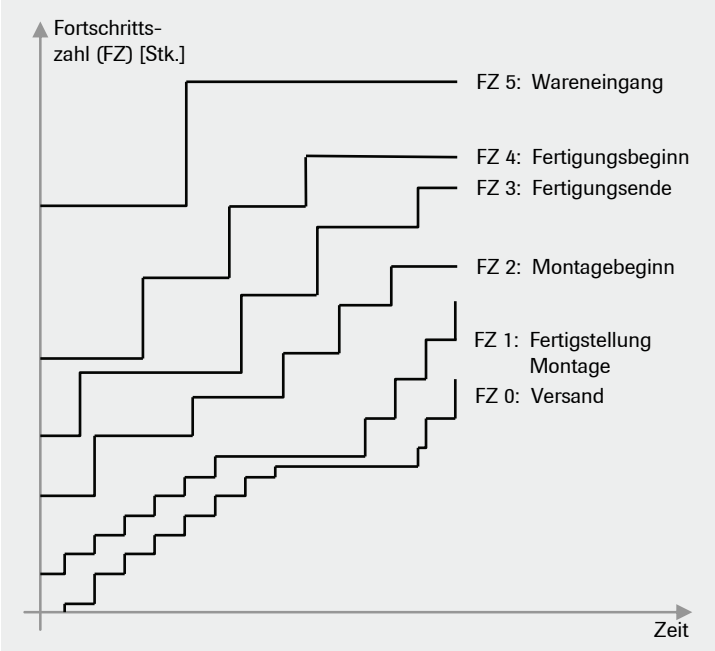


Abbildung 39: Beispiel für ein Fortschrittszahlendiagramm [WIE05]

Der kumulierte Abgang legt die Fortschrittszahl des Kontrollblocks für eine Teilenummer fest und entspricht somit einer Zählnummer. Gleichzeitig entspricht sie der Zugangsfortschrittzahl des nächsten Kontrollblocks. Die Darstellung der Fortschrittszahl in Form einer Mengen-Zeit-Relation ergibt die Fortschrittszahlenkurve. Das Fortschrittszahlendiagramm in Abbildung 39 ist die Zusammenfassung der Fortschrittszahlenkurven entlang dem Herstellprozess für ein bestimmtes Produkt [SCH07].

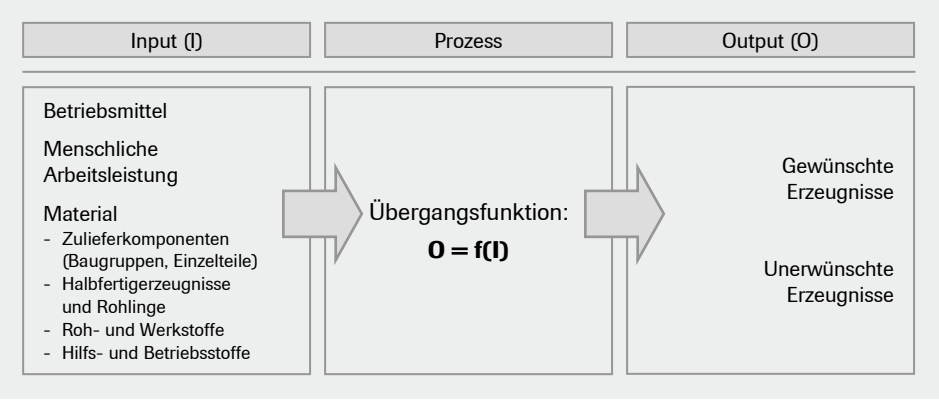


Abbildung 40: Definition eines Prozesses als Übergangsfunktion zwischen Input und Output [SCH08]

Ein Kontrollblock wird im Fortschrittszahlen-Verfahren nicht mehr als Messpunkt, sondern als Messstrecke interpretiert. Die Auswertung von Zu- und Abgangskurve eines solchen Kontroll-

blocks bewertet also stets den Prozess zwischen den beiden Messpunkten [SCH08]. Ein derartig definierter Prozess kann als Zeit und Ressourcen verbrauchende Transformation eines Inputs in einen Output angesehen werden. Dieses Verständnis ist in Abbildung 40 dargestellt.

Ohne den Prozess als solches zu messen wird mit den Fortschrittszahlen beabsichtigt, Informationen über das Verhalten des Prozesses zu erhalten (z.B. über die Leistung). Dazu ist eine Normierung der Messgrössen von Input und Output notwendig, was in der Regel durch die Dimensionierung in Stückzahlen gelingt. Grundsätzlich sind jedoch auch andere Einheiten möglich. Diese Normierung der Fortschrittszahlen auf eine einheitliche Bewertungsgrösse ermöglicht grundsätzlich die Betrachtung des Auftragsfortschritts über mehrere Prozessstufen hinweg [SCH08].

Analog zum Durchlaufdiagramm (vgl. Abschnitt 2.4.2) entspricht der vertikale Abstand zwischen zwei Fortschrittszahlenkurven (derselben Hierarchiestufe) dem Bestand des Kontrollblocks. Der Bestand wird in der Dimension der Fortschrittszahl gemessen. Der horizontale Abstand gibt die Reichweite des Kontrollblocks wieder und die Stufung der Fortschrittszahlenkurve lässt auf die Losgrösse schliessen. Durch Vereinfachung der gestuften Fortschrittszahlenkurve zu einer Geraden lässt sich auch die mittlere Leistung des Kontrollblocks ableiten.

Neben den effektiven Fortschrittszahlen können in einem Fortschrittszahlendiagramm, wie es in Abbildung 39 dargestellt ist, auch Plan-Fortschrittszahlen verwendet werden. Die Plan-Fortschrittszahlen geben den geplanten Abgangsverlauf einer Teilenummer über der Zeit vor. Beim Fortschrittszahlen-Verfahren bauen das komplette Termingefüge und die Planbestände auf den Vorlaufzeiten auf. Somit ist die fortwährende Berechnung und Überprüfung der Durchlauf- und Pufferzeiten für eine sinnvolle und zielgerichtete Anwendung des Fortschrittszahlen-Verfahrens von grosser Bedeutung.

Darstellung im morphologischen Schema

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	Verfahren der Auftragsfreigabe	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	dezentrale Entscheidungsfindung	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	**ja**	nein	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	**geplante**	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	**in der Steuerung**	andere	

Abbildung 41: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Fortschrittszahlen-Verfahrens in der Morphologie

Für den Einsatz als Fertigungssteuerung hängen die Ausprägungen der Merkmale 1 und 2 von der spezifischen Verwendung des Verfahrens resp. von der Kombinationsart mit einem anderen Verfahren ab. Aus diesem Grund sind in Abbildung 41 keine der Ausprägungen markiert. Das

Verfahren benötigt allerdings terminierte Arbeitsvorgänge (siehe Abbildung 41, 3. Merkmal) und die Freigabe von Fertigungsaufträgen erfolgt aufgrund einer terminierten Dringlichkeit (siehe Abbildung 41, 4. Merkmal). Ohne spezifische Präzisierung handelt es sich um eine geplante, terminierte Auftragspriorität (siehe Abbildung 41, 5. Merkmal). Die Regelgrösse Bestand wird ereignisorientiert erfasst und im Diagramm laufend kumuliert (siehe Abbildung 41, 6. Merkmal). Betreffend dem 7. Merkmal in Abbildung 41 ist die Ausprägung „in der Steuerung“ markiert, da mit dem Fortschrittszahlenverfahren pro Kontrollblock der Plan- mit dem Ist-Fortschritt abgeglichen werden kann. Sollte dieser Vergleich auch nur qualitativ oder im Rahmen eines Monitorings „auf Sicht“ erfolgen, so sind damit Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung geschaffen.

Erkenntnisse

Eine interessante Charakteristik des Fortschrittszahlen-Verfahrens ist die dezentrale Autonomie bei gleichzeitig hoher Transparenz. Ein Kontrollblock erhält klare Vorgaben (eine Soll-Vorgabe in Form von Teilenummer, Stückzahl und Terminrahmen) und operiert innerhalb dieser Grenzen selbstständig und unabhängig.

Fazit:
- \+ Dezentrale Struktur mit Leistungsvorgaben (Ansätze von Führungsgrössen, je nach Ausgestaltung oder Kombination des Verfahrens)
- \+ Visuell erfassbares Verfahren (mit Verlaufsinformationen), hohe Transparenz
- \- keine konkreten Algorithmen

3.4.8. Das Basestock-Verfahren

Allgemeines

Das Basestock-Verfahren ist eines der ältesten Fertigungssteuerungsverfahren überhaupt. Es wurde in den 50er-Jahren von Clark und Scarf entwickelt [CLA60]. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, die Informationsverzögerung durch eine dezentrale Lagerhaltungspolitik zu überwinden. Das Verfahren eignet sich besonders für ein variantenarmes Produktspektrum, das in einem ungetakteten Fliessfertigungssystem hergestellt wird [RÜC06].

Verfahrensbeschreibung

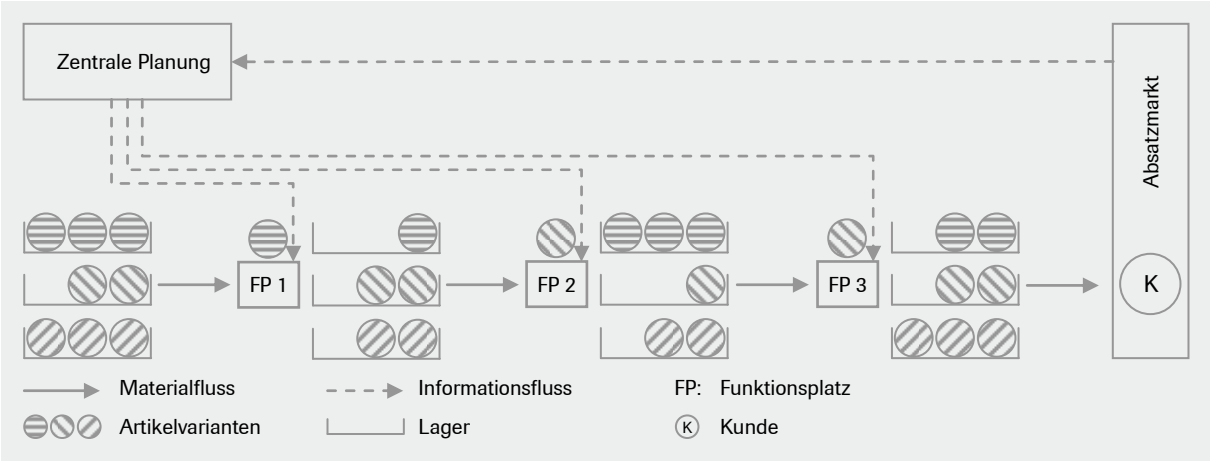


Abbildung 42: Prinzip des Basestock-Verfahrens in einer beispielhaften Fertigung mit drei Artikelvarianten

An jedem Arbeitssystem im Fertigungssystem werden variantenspezifische Lager (engl. Basestock: Grundbestand) geführt. Eine zentrale Planung definiert den Lagerbestand der Basestocks

[RÜC06]. Ab diesen dezentralen Lagern werden Nachfragen – welche durch die zentrale Planung an die Arbeitssysteme übermittelt werden – unverzüglich bedient. Somit wird beim Basestock-Verfahren implizit jede Kundennachfrage direkt und zeitgleich an die Arbeitssysteme weitergeleitet. Diese Information stellt für jedes Arbeitssystem die Autorisierung zum Nachfertigen der entsprechenden Variante dar. Es muss nicht zwingend jedes Arbeitssystem in die Basestock-Steuerung miteinbezogen sein. Es ist auch möglich, dass mehrere Arbeitssysteme zu einem Kontrollblock zusammengefasst werden, analog dem Fortschrittszahlen-Verfahren in Abschnitt 3.4.7 [LÖD08]. Das Prinzip des Informations- und Materialflusses der Basestock-Steuerung ist in Abbildung 42 in einem beispielhaften Fertigungssystem mit drei Artikelvarianten dargestellt.

Beim Basestock-Verfahren mit kontinuierlicher Bestandsüberwachung wird zu jedem Zeitpunkt, zu dem eine Bedarfsinformation eingeht, überprüft, welche Menge freigegeben werden muss. Beim Basestock-Verfahren mit periodischer Bestandsüberwachung wird in festgelegten Intervallen überprüft, ob eine Freigabe erfolgen muss. Die durch die zentrale Planung tatsächlich freizugebende Menge kann von der effektiven Nachfrage abweichen, wenn Vorgaben bezüglich von Losgrössen einzuhalten sind [RÜC06].

Das Verfahren entspricht somit nicht dem Verständnis gemäss Abbildung 4, in welchem eine Liste mit Fertigungsaufträgen als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung funktioniert. Analog zum Kanban-Verfahren ist es auch nicht zwingend, dass ein Fertigungsauftrag losweise durch den gesamten Herstellprozess gesteuert wird, da die Bedarfsinformationen durch die zentrale Planung unterschiedlich grosse Inhalte ausweisen kann. Für den Fall, dass bei einem Arbeitssystem mehrere Bedarfsinformationen gleichzeitig eintreffen, ist eine entsprechende Reihenfolgeregelung festzulegen. Das Basestock-Verfahren selber gibt keine feste Reihenfolgeregel vor [LÖD08].

Darstellung im morphologischen Schema

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	**zentrale Entscheidungsfindung**	dezentrale Entscheidungsfindung	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	**nein**	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	nach Dringlichkeit (Termin)	**nach Dringlichkeit (nicht Termin)**	bestandsbedingt	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	geplante	zustandsbedingte	**andere**	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	**periodisch (zeitgetrieben)**	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	**keine**	in der Planung	in der Steuerung	andere	

Abbildung 43: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Basestock-Verfahrens in der Morphologie

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 43 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Das Basestock-Verfahren ist ein Verfahren, das die Bearbeitung der einzelnen Arbeitsvorgänge aufgrund einer Autorisierung durch die zentrale Planung freigibt (siehe Abbildung 43, 2. Merkmal). Die Autorisierung zur Bearbeitung des ersten Arbeitsvorgangs entspricht der Freigabe von Fertigungsaufträgen. Somit handelt es sich um eine Auftragsfreigabe in-

folge einer Dringlichkeit, die nicht auf einen Termin zurückgeht (siehe Abbildung 43, 4. Merkmal). Entsprechend handelt es sich beim Basestock-Verfahren um ein Verfahren der Auftragsfreigabe (siehe Abbildung 43, 1. Merkmal). Aufgrund der zentralen Planung, welche die Bearbeitung der einzelnen Arbeitsvorgänge autorisiert, benötigt das Verfahren keine terminierten Arbeitsvorgänge (siehe Abbildung 43, 3. Merkmal). Der Zeitpunkt der Bearbeitungsautorisierung ist abhängig von der Planungsfunktionalität (Verbraucher-, Kunden- oder Prognoseinformationen sowie auch Kombinationen davon). Für den Fall, dass mehrere Bearbeitungsautorisierungen bei einem Arbeitssystem gleichzeitig eintreffen, ist eine entsprechende Priorisierung der Bearbeitungsreihenfolge festzulegen. Aus diesem Grund ist die Ausprägung „andere“ des 5. Merkmals in Abbildung 43 markiert. Die Ermittlung der Regelgrösse „Bestand“ (pro Arbeitssystem resp. Kontrollblock) erfolgt bei der Verfahrensvariante mit kontinuierlicher Bestandsüberwachung ereignisorientiert. Bei der Verfahrensvariante mit periodischer Bestandsüberwachung erfolgt dies periodisch. Entsprechend sind beim 6. Merkmal in Abbildung 43 zwei Ausprägungen markiert. Das Steuerungsverfahren nach dem Basestockprinzip benötigt keine Funktionalitäten, welche direkte Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung bieten (siehe Abbildung 43, 7. Merkmal).

Erkenntnisse

Bei konstanten Basestocks vermeidet das Verfahren die Verstärkung von Nachfrageschwankungen entlang der Lieferkette (Bullwhip-Effekt). Das Verfahren eignet sich daher auch für die Koordination von gesamten Lieferketten [LÖD08]. Nachteilig ist der variantenspezifische und pro Arbeitssystem notwendige Lagerbestand. Dieser führt insbesondere bei zunehmender Variantenvielfalt zu hohen Umlaufbeständen, entsprechenden Kapitalkosten und den dafür notwendigen Platzbedarf. Nicht zu vernachlässigen ist das Mehrfachhandling durch die Ein- und Auslagerung pro Kontrollblock sowie der Mehraufwand für die Bestandserfassung und –meldung.

Einzigartig für das Verfahren ist die Eigenschaft, dass Bedarfsinformationen unverzüglich an die dezentralen Arbeitssysteme geleitet werden. Somit ist das Basestock-Verfahren das einzige Verfahren, das die Möglichkeit bietet, eine effektive Verbindung (ohne Zeitverzögerung) zwischen Marktnachfrage und Arbeitssystemen herzustellen. Diese Feststellung setzt voraus, dass es sich bei den Informationsflüssen um effektive Kundenbestellungen oder zumindest um Verbrauchsinformationen handelt, und nicht um Prognosebedarfe. Im letzteren Fall kann es sein, dass die Informationen verzerrt und/oder verzögert beim Arbeitssystem eintreffen. Beim Kanban-Verfahren erfolgt ein analoger Informationsfluss sequentiell über die einzelnen Regelkreise, dem Materialfluss entgegengerichtet. Beim Bestellpunkt-Verfahren ist der Bezug immer ein Verbrauch und die Information läuft ebenfalls sequentiell, allerdings in Richtung Materialfluss (da es sich um ein auftragerzeugendes Verfahren handelt).

Fazit:
- \+ Keine zeitliche Verzögerung des Informationsflusses zwischen Nachfrage und ausführenden Stellen (Arbeitssysteme)
- \- Zunehmender Bestand, Platzbedarf und Handlingsaufwand bei Variantenvielfalt
- \- Kein Bezug zwischen Fertigungslos und einem gesamtheitlichen Fertigungsauftrag, keine Rückverfolgung möglich (analog Kanban-Verfahren)
- \- Kein Einsatz einer Fertigungsauftragsliste im Verständnis einer Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (gemäss Abbildung 4)

3.4.9. Das Polca-Verfahren

Allgemeines

Polca ist die Abkürzung für ***P**air-Cell **O**verlapping **L**oops of **C**ards with **A**uthorization*. Das Verfahren wurde in den 90er-Jahren von Rajan Suri (University of Wisconis-Madison) entwickelt [RÜC06]. Das Polca-Steuerungsprinzip wurde ganz bewusst als Alternative zum Steuerungsteil des MRPII-Verfahrens und zum Kanban-Verfahren positioniert [LÖD08]. Mit der gezielten Positionierung des Steuerungsverfahrens wurde insbesondere der Verwendungszweck für die Herstellung von kleinen Losen mit grossem Variantenreichtum beabsichtigt [PAW07]. Polca ist Bestandteil des umfassenden Quick Response Manufacturing-Konzepts, das insbesondere auf die Organisation der Fertigung in Fertigungsinseln und auf die Reduktion der Durchlaufzeiten abzielt [SUR98].

Verfahrensbeschreibung

Der Grundgedanke des Verfahrens liegt darin, dass Fertigungsaufträge in vorgelagerten Prozessen nur gestartet werden, wenn der nachgelagerte Prozess über eine ausreichende Kapazität verfügt, um den Fertigungsauftrag weiter zu bearbeiten [PAW07]. Im Idealfall – jedoch nicht zwangsläufig - operieren die Fertigungsinseln im One-Piece-Flow [LÖD08]. Das Polca-Verfahren setzt voraus, dass die Fertigung in Inseln organisiert ist. Dabei kann es sich bei den Inseln sowohl um Werkstattfertigungs- als auch Gruppenfertigungssysteme handeln [RÜC06].

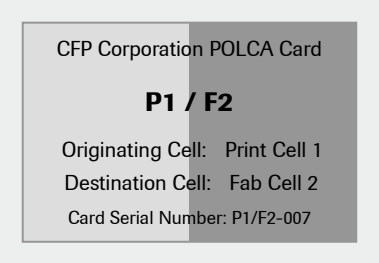


Abbildung 44: Beispiel einer Polca-Karte [SUR03]

Jedem Paar von Fertigungsinseln werden Polca-Karten zugeordnet. Diese Karten pendeln zwischen den beiden zugewiesenen Inseln und autorisieren – analog dem Kanban-Verfahren – die Bearbeitung von Fertigungsaufträgen in der Ursprungsfertigungsinsel. Die Abbildung 44 zeigt eine solche Polca-Karte. Darauf ist (neben einer Kartenzählnummer) sowohl die Ursprungsfertigungsinsel (P1) als auch die Zielfertigungsinsel (F2) aufgeführt. Damit regeln die Polca-Karten den Bestand innerhalb des entsprechenden Paars von Fertigungsinseln. Aus der Sicht der Fertigungsinseln kann jede Insel zu mehreren Polca-Karten-Kreisläufen gehören. Die Anzahl Kreisläufe ergibt sich durch die entsprechende Anzahl Vorgänger- und Nachfolgerinseln. Zwischen zwei Fertigungsstufen können mehrere Kartenkreisläufe etabliert sein, falls sich mehrere Fertigungsinseln auf einer Produktionsstufe befinden (siehe Abbildung 45). Im Unterschied zum Kanban-Verfahren verfügt die Polca-Karte über keinen Bezug zur Artikelnummer. Weiter ist ersichtlich, dass die Polca-Karte in Abbildung 44 in zwei Farben geteilt ist: jede Farbe einer Polca-Karte ist unternehmensweit mit einer entsprechenden Fertigungsinsel assoziiert [SUR03].

Das Polca-Verfahren steuert den Informations- und Materialfluss zwischen den Fertigungsinseln. Dazu ist ein Planungssystem notwendig, welches die Fertigungsaufträge terminiert [LÖD08]. Somit entspricht das Polca-Verfahren dem Verständnis einer Liste mit Fertigungsaufträgen als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (siehe Abbildung 4). Die Terminierung der Fertigungsaufträge erfolgt grundsätzlich nach dem MRPII-Planungsverfahren [RÜC06]. Der Output des

MRPII-Planungsablaufs stellt die Fertigungsauftragsliste dar, welche durch das Polca-Steuerungsverfahren umgesetzt werden soll. Suri [SUR98] beschreibt ein „high-level-MRP“ (HL/MRP), welches eine segmentbezogene, auf die Fertigungsinseln abgestimmte, Durchlaufterminierung vornimmt. Damit werden Planstarttermine pro Fertigungsauftrag und -insel ermittelt (sogenannte Freigabezeitpunkte), welche ein Fertigungsauftrag durchlaufen muss [LÖD08]. Es ergibt sich ein geringerer Planungsaufwand als wenn jeder einzelne Arbeitsvorgang terminiert werden muss.

Der prinzipielle Ablauf des Polca-Verfahrens ist in Abbildung 45 am Beispiel eines Fertigungssystems mit vier Wertschöpfungsstufen dargestellt. Die zwei Fertigungsinseln der ersten Stufe führen einen Druck durch (engl.: printing). Die zweite Stufe ist eine Fertigungsstufe (engl.: fabrication) bestehend aus drei Fertigungsinseln und die dritte Stufe führt die Montage (engl.: assembly) durch, welche vier Fertigungsinseln umfasst. Die letzte Fertigungsstufe, der Versand (engl.: shipping), besteht aus einer Fertigungsinsel. Die Benennung der Fertigungsinseln in Abbildung 45 korrespondiert mit der Karte in Abbildung 44, welche dem Kreislauf „P1/F2“ (ganz links) angehört.

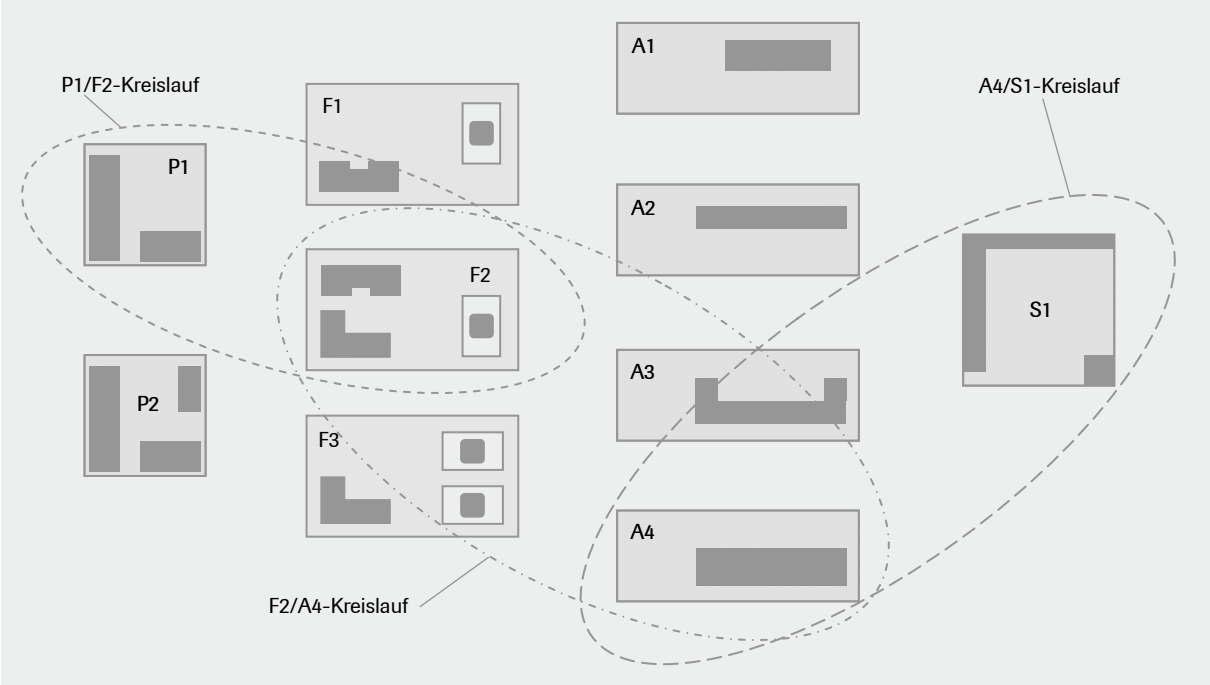


Abbildung 45: Prinzip des Polca-Verfahrens an einem beispielhaften Fertigungssystem mit vier Fertigungsstufen [SUR03] – die Polca-Karte des P1/F2-Kreislaufs ist in Abbildung 44 dargestellt

Eine Ursprungsfertigungsinsel darf einen Fertigungsauftrag nur dann bearbeiten, wenn einerseits der Freigabezeitpunkt erreicht ist und andererseits eine Polca-Karte frei ist. Die Polca-Karte muss der Ursprungs- und der Zielfertigungsinsel zugeordnet sein. Falls eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt ist, dann ist der Fertigungsauftrag blockiert. Handelt es sich bei der Ursprungsfertigungsinsel um die erste Insel, welche der Fertigungsauftrag zu durchlaufen hat, dann entspricht der Freigabezeitpunkt dem geplanten Starttermin des Fertigungsauftrags. Handelt es sich bei der Ursprungsfertigungsinsel um die letzte zu durchlaufende Insel des Fertigungsauftrags, so erfordert der Arbeitsbeginn keine Polca-Karte. Ist ein Fertigungsauftrag blockiert, so prüft die Fertigungsinsel, ob für andere Fertigungsaufträge im Bestand die beiden Freigabebedingungen erfüllt sind. Falls dies der Fall ist und der Bearbeitungsbeginn ist autorisiert, so wird dem Fertigungsauftrag mit Bearbeitungsbeginn eine Polca-Karte fest zugeordnet. Sie verbleibt beim Fertigungsauftrag bis zum Bearbeitungsende in der Zielfertigungsinsel. Wenn die Polca-Karte in der Zielfertigungsinsel frei wird, kann sie wieder den Bearbeitungsbeginn eines neuen Fertigungsauftrags in der Ursprungsfertigungsinsel autorisieren.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in Abbildung 46 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Das Polca-Verfahren ist ein Verfahren, das die Fertigungsaufträge aus einer Liste freigibt (siehe Abbildung 46, 1. Merkmal). Die Fertigungsauftragsliste wird durch einen übergeordneten Planungsprozess generiert und gepflegt. Die Entscheidungsfindung betreffend der Bearbeitungsfreigabe in den einzelnen Fertigungsinseln hängt von zwei Bedinungen ab: dem Erreichen des durch die zentrale Planung berechneten Freigabezeitpunkts sowie eine freie, entsprechende Polca-Karte (dezentral). Demzufolge handelt es sich beim 2. Merkmal in Abbildung 46 um eine kombinierte Entscheidungsfindung. Das Polca-Verfahren erfordert eine Terminierung der einzelnen Prozessschritte (Berechnung der Freigabezeitpunkte), auch wenn mehrere Arbeitsvorgänge zu einem Prozessschritt zusammengefasst werden (siehe Abbildung 46, Merkmal 3). Die Freigabe eines Fertigungsauftrags hängt ebenfalls vom planerisch ermittelten Freigabezeitpunkt und einer freien, entsprechenden Polca-Karte (dezentral) ab. Deshalb sind beim 4. Merkmal in Abbildung 46 zwei Ausprägungen markiert. Bei der Auftragspriorität handelt es sich um eine geplante Priorität (siehe Abbildung 46, 5. Merkmal). Die dezentrale Einheit (eine Fertigungsinsel) verfügt lediglich über die geplanten Freigabezeitpunkte der Fertigungsaufträge. Das Polca-Verfahren limitiert (regelt) den Bestand der Fertigungsinseln. Der Bestand wird dabei jedoch nicht quantitativ erfasst (siehe Abbildung 46, 6. Merkmal). Das Polca-Verfahren verfügt über keine direkten Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung. Im weiteren Sinne kann die Blockadehäufigkeit einzelner Fertigungsinseln als Kapazitätskriterium aufgefasst werden (siehe Abbildung 46, 7. Merkmal). Umgekehrt lassen, im Unterschied zum Kanban-Karten, unbenutzte Polca-Karten auf eine gewisse Überkapazität schliessen.

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	dezentrale Entscheidungsfindung	**kombinierte Entscheidungsfindung**	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	**ja**	nein	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	**bestandsbedingt**	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	**geplante**	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	**keine**	periodisch (zeitgetrieben)	periodisch (ereignisorientiert)	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	**in der Steuerung**	andere	

Abbildung 46: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Polca-Verfahrens in der Morphologie

Erkenntnisse

Das Polca-Verfahren wurde explizit für die Steuerung eines variantenreichen Produktespektrums ausgelegt. Der wesentliche Grund, weshalb dies möglich ist, liegt darin, dass die Polca-Karten keinen Bezug zur Artikelnummer aufweisen. Sie harmonisieren somit das Kapazitätsangebot der Fertigung mit dem Bedarf an Kapazitäten durch die Fertigungsaufträge. Dies erfolgt über eine Bestandslimitierung, welche durch die zentrale Planung in Form von Anzahl Polca-Karten festgelegt

wird. Somit wird ein gewisser Flussgrad der freigegebenen Fertigungsaufträge aufrecht erhalten und es resultieren konstante, begrenzte Durchlaufzeiten. Das Polca-Verfahren ist ein Steuerungsprinzip, welches die Fertigungsaufträge zwischen den Fertigungsinseln steuert. Die Steuerung innerhalb einer Fertigungsinsel wird durch das Verfahren nicht vorgegeben. In den Fertigungsinseln selber kann grundsätzlich ein beliebig anderes Verfahren eingesetzt werden [SUR98, LÖD08].

Fazit: +/- Nicht der (vermeintlich) dringendste Fertigungsauftrag wird bearbeitet, je nach Bestandssituation der Nachfolgerfertigungsinseln kann es auch ein anderer sein

+/- Das Verfahren orientiert sich am Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle und ist somit kompatibel mit Planungsverfahren wie MRPII

\+ Bestandszunahme in der Fertigung wird durch die Anzahl Polca-Karten begrenzt

\- Bei der Auftragspriorität handelt es sich um eine geplante Priorität (analog MRPII)

3.4.10. Die Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung

Allgemeines

Die Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung (DBF) basiert auf dezentralen Bestandsregelkreisen zwischen den Arbeitssystemen der Fertigung. Die DBF bietet die Voraussetzung, die Fertigungsmitarbeiter in die Verantwortung für die logistische Zielerreichung mit einzubeziehen [LÖD08]. Das Verfahren wurde von Lödding am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Projekt entwickelt [LÖD01].

Verfahrensbeschreibung

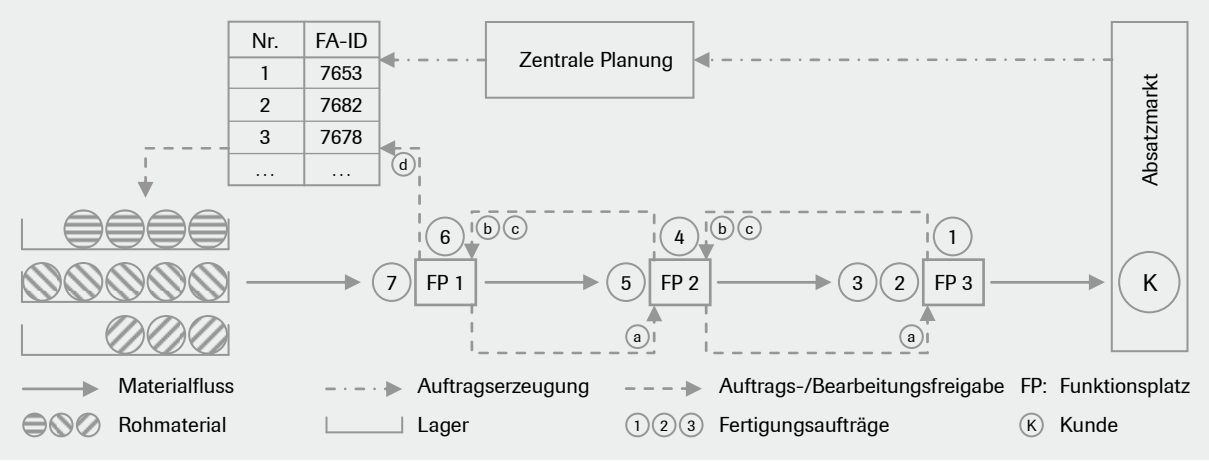


Abbildung 47: Prinzip des DBF-Verfahrens [LÖD01]

Die DBF setzt ein übergeordnetes, zentrales PPS-Planungsinstrument voraus, welches aufgrund von Marktinformationen und/oder Kundenaufträgen eine Liste mit Fertigungsaufträgen generiert [LÖD08]. Somit entspricht das Verfahren dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung, wie es in Abschnitt 2.1 vorgestellt wurde. Mittels einer Rückwärtsterminierung wird für jeden Fertigungsauftrag ein geplanter Starttermin berechnet [LÖD01]. Ein Fertigungsauftrag gilt als dringend, sobald der ermittelte Planstarttermin erreicht oder überschritten ist. Unter bestimmten Voraussetzungen gilt ein Fertigungsauftrag auch als dringend, sobald der entsprechende Planstarttermin unter die Grenze eines definierten Vorgriffshorizontes fällt. Weiter wird bei der DBF jedem Arbeitssystem ein Bestandskonto zugeordnet. Das

Bestandskonto enthält die (kumulierten) Vorgabezeiten jener Fertigungsaufträge, die sich zum Betrachtungszeitpunkt im Bestand des Arbeitssystems befinden (Direktbestand). Zusätzlich wird ein Indirektbestand geführt, der aus den Vorgabezeiten jener Fertigungsaufträge besteht, die gegenwärtig an direkten Vorgängerarbeitssystemen bearbeitet werden (gewisse Analogie zur BOA). Ausserdem verfügt jedes Bestandskonto über eine Bestandsgrenze, welche mit Hilfe der Theorie über die Produktionskennlinie aus Abschnitt 2.5 abgeleitet werden kann [LÖD08].

Die Verfahrensregeln fasst Lödding in sechs Schritte zusammen, welche im prinzipiellen Ablauf der DBF gemäss Abbildung 47 nachvollzogen werden können [LÖD01]:

- Bevor ein Mitarbeiter einen Fertigungsauftrag zu bearbeiten beginnt, fragt er beim nachfolgenden Arbeitssystem des betreffenden Fertigungsauftrags um die Bearbeitungsfreigabe nach (Informationsfluss a in Abbildung 47). Der letzte Arbeitsvorgang eines Auftrags kann immer bearbeitet werden.
- Das nachfolgende Arbeitssystem trifft die Entscheidung über die Bearbeitungsfreigabe auf Grundlage seiner Bestandsgrenze. Übertrifft die Summe von Bestand und Indirektbestand die Bestandsgrenze, verweigert es die Bearbeitungsfreigabe (Informationsfluss b in Abbildung 47). Ansonsten gibt es den Fertigungsauftrag zur Bearbeitung frei (Informationsfluss c) und addiert dessen Auftragszeit zu seinem Indirektbestand.
- Erhält ein Arbeitssystem für einen Fertigungsauftrag die Bearbeitungsfreigabe, beginnt es mit der Bearbeitung. Andernfalls prüft es für die weiteren Fertigungsaufträge im Bestand der Reihe nach die Bearbeitungsfreigabe (wiederum Informationsfluss a in Abbildung 47), sofern diese für ein anderes Nachfolgerarbeitssystem bestimmt sind.
- Nach Bearbeitung eines Fertigungsauftrags streicht ihn der Mitarbeiter aus dem Gesamtbestand des Arbeitssystems. Unterschreitet dadurch der Gesamtbestand die Bestandsgrenze, erteilt der Mitarbeiter die Bearbeitungsfreigabe für Fertigungsaufträge, denen sie eventuell im Vorfeld verweigert wurde, bis die Bestandsgrenze durch den Anstieg des Indirektbestands wieder überschritten wird (Informationsfluss c).
- Jedem Arbeitssystem ist eine Positionsnummer zugeordnet, die die relative Position des Arbeitssystems im Materialfluss kennzeichnet. Unabhängig vom Überschreiten der Bestandsgrenze erteilt ein Arbeitssystem die Bearbeitungsfreigabe für Fertigungsaufträge, wenn das nachfragende Arbeitssystem eine höhere Positionsnummer hat (also ein Rückfluss vorliegt). Diese Regel verhindert eine wechselseitige Blockade der Arbeitssysteme.
- Die Produktionsplanung generiert eine Liste dringender Fertigungsaufträge (Planstarttermin ist erreicht, überschritten oder er fällt in den Vorgriffshorizont). Diese Fertigungsaufträge werden freigegeben, wenn der Bestand am Beginnarbeitssystem die Bestandsgrenze unterschreitet. Sie werden mit der Freigabe zum Bestand des Beginnarbeitssystems hinzugerechnet. Bei einer sehr leistungsfähigen Materialbereitstellung können die Fertigungsaufträge auch erst unmittelbar vor dem Bearbeitungsbeginn freigegeben werden (Informationsfluss d in Abbildung 47).

Die letzte Regel eröffnet zwei Varianten für die Fertigungsauftragsfreigabe. Im ersten Fall wird die Bestandssituation des zweiten Arbeitssystems nicht berücksichtigt. Im zweiten Fall liegt die Bearbeitungsfreigabe unter Berücksichtigung der Belastungssituation des zweiten Arbeitssystems bereits vor und die Freigabe des Fertigungsauftrags entspricht dem Bearbeitungsstart am ersten Arbeitssystem [LÖD08]. Dies reduziert die Durchlaufzeit am ersten Arbeitssystem auf die Durchführungszeit.

Darstellung im morphologischen Schema

Die Ausprägungen der jeweiligen Merkmale in der Abbildung 48 ergeben sich aus der Beschreibung des Verfahrens. Das Verfahren der DBF setzt eine übergeordnete Planung voraus und gibt die Fertigungsaufträge in der generierten Liste frei (siehe Abbildung 48, 1. Merkmal). Die Entscheidungsfindung betreffend der AVG-Bearbeitung erfolgt dezentral, indem die Arbeitssysteme sich die Bearbeitungserlaubnis bei den Nachfolger-Arbeitssystemen erfragen (siehe Abbildung 48, 2. Merkmal). Die Freigabe der Fertigungsaufträge erfolgt sowohl aufgrund einer terminierten Dringlichkeit als auch aufgrund einer Bestandsbedingung an den Arbeitssystemen (siehe Abbildung 48, 4. Merkmal). Für die Bestandsbedingung werden je nach Variante der letzten Regel der Bestand des ersten oder die Bestände der ersten zwei Arbeitssysteme geprüft. Das DBF-Verfahren bedingt zwar keine terminierten Arbeitsvorgänge, für die Freigabe der Fertigungsaufträge ist allerdings der Starttermin des ersten Arbeitsvorgangs erforderlich (siehe Abbildung 48, 3. Merkmal). Nach Freigabe der Fertigungsaufträge verfügen diese über keine explizite Priorität mehr. Die Bearbeitungsreihenfolge an den einzelnen Arbeitssystemen wird nach dem FIFO-Prinzip festgelegt (siehe Abbildung 48, 5. Merkmal). Die DBF lässt allerdings auch andere Reihenfolgeprinzipien zu. Die Regelgrösse „Bestand“ an den einzelnen Arbeitssystemen wird mit jedem Zu- und Abgang aktualisiert. Entsprechend lautet die Ausprägung des 6. Merkmals in Abbildung 48 „periodisch (ereignisorientiert)“. Die Voraussetzungen für eine Kapazitätssteuerung sind durch die Führung der Bestandskonten pro Arbeitssystem in der Steuerung gegeben (siehe Abbildung 48, 7. Merkmal). Ausserdem schildert Lödding [LÖD01] die Möglichkeit, die Blockadehäufigkeit eines Arbeitssystems als Indiz einer Unterkapazität im Rahmen einer Engpass-Analyse zu interpretieren (analog zum Polca-Verfahren in Abschnitt 3.4.10).

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	**dezentrale Entscheidungsfindung**	kombinierte Entscheidungsfindung	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	nein	**nur Starttermin des 1. AVG**	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	**nach Dringlichkeit (Termin)**	nach Dringlichkeit (nicht Termin)	**bestandsbedingt**	andere
5.	Auftragspriorität	**keine (FIFO)**	geplante	zustandsbedingte	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	**in der Steuerung**	andere	

Abbildung 48: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten der Dezentralen Bestandsorientierten Fertigungsregelung in der Morphologie

Erkenntnisse

Das DBF-Verfahren führt analog wie das BOA-Verfahren ein Belastungskonto pro Arbeitssystem. Nach Lödding [LÖD08] kann die Bestandsgrenze durch die Mitarbeitenden im Betrieb festgelegt werden. Dieses Vorgehen kann problematisch sein, da die Bestandsgrenze mit der geforderten Leistung des Arbeitssystems übereinstimmen sollte. Ein grosser Vorteil der Bestandskonten be-

steht grundsätzlich darin, dass direkt die Möglichkeiten einer Kapazitätssteuerung geschaffen ist. Im DBF-Verfahren können zu geringe Kapazitäten direkt aus der Häufigkeit der verursachten Blockaden abgeleitet werden.

Fazit: +/- Parallelen zur BOA (wie z.B. Bestandskonten mit direktem und indirektem Bestand, Belastungsschranken, Bearbeitungsblockaden, FIFO-Prinzip, Starttermin des FA)

+ Explizite Gewichtung der Regelgrösse „Bestand“

- Fehlende Führungsgrösse (Belastungschranke ist eine Maximalwert und kein Sollwert)

3.5. Gestaltungsgrundsätze für eine Steuerungs- und Regelungsstrategie

In Abschnitt 3.4 werden zehn existierende Steuerungsverfahren mit dem jeweiligen Funktionsprinzip vorgestellt. Aus dieser Darstellung werden im Folgenden die Erkenntnisse zusammengefasst, welche für die Entwicklung einer Steuerungs- und Regelungsstrategie wichtig sind. Anhand dieser Erkenntnisse sind Anforderungen in Form von Gestaltungsgrundsätzen für eine solche Strategie abzuleiten.

1. Erkenntnis: Dominanz Planung

Gemäss der funktionalen Gliederung der PPS in Abbildung 4 werden die Hauptaufgaben der Fertigungssteuerung in Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung zusammengefasst. Diese Funktionen sind bei einigen Verfahren stark reduziert. Insbesondere auch beim weit verbreiteten MRPII-Verfahren ist festzustellen, dass aufgrund des detaillierten Planungsablaufs die Steuerungsfunktionalitäten Auftragsfreigabe und –überwachung auf Soll/Ist-Vergleiche von Arbeitsvorgangsterminen beschränkt sind. Auch nach Lödding wird gegenwärtig die logistische Zielerreichung eindeutig von der Produktionsplanung dominiert [LÖD08]. Als Gründe dafür sieht er im Teilgebiet Planung intellektuelle Herausforderungen wie Optimierungsprobleme, den lukrativen Markt der Softwareanbieter sowie die tatsächliche Notwendigkeit eines guten und realistischen Produktionsplans als Voraussetzung für eine hohe logistische Zielerreichung.

Aus diesen Gründen soll die Steuerungs- und Regelungsstrategie funktional soweit ausgeprägt sein, dass sie möglichst unabhängig von Planstart- und –endterminen sowohl auf Stufe Arbeitsvorgang als auch auf Stufe Fertigungsauftrag funktioniert. Daraus resultiert der Anspruch, dass künftig eine Alternative zu Investitionsanträgen zur Verbesserung der Planungsqualität (mit dem Ziel, die logistische Zielerreichung zu verbessern) existiert. Diese Alternative stellt das Steuerungs- und Regelungsverfahren dar. Der Anspruch findet sich im…

➔ **Gestaltungsgrundsatz 1:**
Die Steuerungs- und Regelungsstrategie operiert unabhängig von Planterminen.

Die Sollendtermine der Fertigungsaufträge sind in dem Kontext nicht als Plantermine zu verstehen. Je nach Ausprägung des Planungsprinzips (Prognose-, Verbrauchs- oder Kundenauftragsverfahren) werden die Sollendtermine der Fertigungsaufträge eher implizit oder aber zunehmends direkter durch den Markt vorgegeben. Unabhängig vom Grad des direkten Bezugs zur Marktnachfrage werden die Sollendtermine für das Steuerungs- und Regelungsverfahren den terminlichen Bezug der Fertigungsaufträge darstellen. Dieser Bezug ist durch das Verfahren nicht beeinflussbar und auch nicht Gegenstand einer Optimierung.

2. Erkenntnis: Liste mit Fertigungsaufträgen wirkt als Scharnierstelle

In Abschnitt 2.1.1 wurde die Liste mit Fertigungsaufträgen als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung vorgestellt (siehe Abbildung 4). Dieses Verständnis lässt sich auf fast alle vorgestellten Steuerungsverfahren abbilden. Ausnahmen bilden das Kanban-Verfahren, das Bestellbestand-Verfahren, das Basestock-Verfahren und je nach Interpretation/Anwendung auch das Fortschrittszahlen-Verfahren. Beim Kanban- und beim Bestellbestand-Verfahren handelt es sich um auftragserzeugende Verfahren, die aufgrund eines tatsächlichen Verbrauchs einen Fertigungsauftrag generieren. Infolge dieser Eigenschaft ist das Verständnis der Scharnierstelle per Definition nicht möglich. Beim Fortschrittszahlen- und Basestock-Verfahren werden Bedarfsmeldung respektive Planvorgaben pro Arbeitssystem (Kontrollblock) übermittelt, ohne direkten Bezug zu einem Fertigungsauftrag.

Diese Verfahren, welche nicht nach dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle funktionieren, sind nicht primär für den Einsatz bei hohem Variantenreichtum mit starken Nachfrageschwankungen konzipiert. Die Steuerungs- und Regelungsstrategie soll auf genau dieses Einsatzgebiet fokussiert sein (siehe Abschnitt 1.4.3). Um für den Praxiseinsatz keine zusätzlichen Voraussetzungen schaffen zu müssen resultiert der…

➔ **Gestaltungsgrundsatz 2:**
Die Steuerungs- und Regelungsstrategie funktioniert nach dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung und ist damit kompatibel mit Verfahren, die bereits im Einsatz sind (dies trifft auf mindestens 80% aller Fälle zu).

Die Fertigungsauftragsliste enthält pro Fertigungsauftrag mindestens die Identifikationsnummer des Fertigungsauftrags, die Operationsreihenfolge mit Arbeitssystemidentifikation und Auftragszeit sowie dem Sollendtermin des Fertigungsauftrags. Dieser Informationsumfang ist bei den verbreiteten MRPII-Verfahren am Ende des Planungsprozesses standardmässig verfügbar.

3. Erkenntnis: bei einem Variantenfertiger können auftragsanonyme Puffer zu einem hohen Bestandslevel führen – gesplittete Fertigungsaufträge in hochkomplexen Materialflusssystemen können zu Transparenzsverlusten führen

Das Kanban- und das Basestock-Verfahren bauen auf dem Prinzip von dezentralen Pufferbeständen pro Variante auf. Eine Bearbeitungsfreigabe pro Arbeitsvorgang wird durch einen konkreten Verbrauch respektive eine konkrete Nachfrage autorisiert. Dieses Prinzip eignet sich nicht für den Einsatz bei einer hohen, sich ändernden Variantenvielfalt und schwankender Nachfrage aufgrund der hohen Umlaufbestände (mit langen Durchlaufzeiten) und des resultierenden Platzbedarfs. Wird eine Variante vom Markt nicht mehr nachgefragt, so „puffern“ die spezifischen Halbfertigerzeugnisse an den definierten Stellen innerhalb des Fertigungsablaufs auf unbestimmte Zeit (bis zur nächsten Nachfrage). Dieser Fall kann nicht eintreten, wenn ein Fertigungsauftrag nicht nur einen Ausschnitt der (internen) Wertschöpfungskette umfasst (z.B. internes Kanban), sondern den gesamten, internen Fertigungsablauf beinhaltet. Das bedeutet, dass ein Fertigungsauftrag sämtliche Operationsfolgen umfasst, im allgemeinen Sinne die (interne) Wertschöpfungskette zwischen Rohmateriallager und Fertigwarenlager. Damit entspricht die Erfassung der Fertigungsdurchlaufzeit gemäss den Definitionen aus Abschnitt 2.3.2 auch der effektiven Verweildauer des Materialwertes in der Fertigung.

Die losweise Bearbeitung der Arbeitsvorgänge sowie der losweise Transport zwischen den Arbeitsvorgängen schafft Transparenz (z.B. bei kurzfristigen Änderungswünschen durch den Kunden, Statusnachfragen durch die Planung, etc.) und ermöglicht eine gezielte Beeinflussung (Be-

schleunigung oder Verlangsamung) von einzelnen Fertigungsaufträgen. Ausserdem ist bei der losweisen Betrachtung der Status der Fertigungsaufträge jederzeit eindeutig gegeben (Zugehörigkeit zum Arbeitssystem, auf Transport, Wartend, in Bearbeitung, etc.), was die Erfassung der Betriebsdaten in der Regel vereinfacht.

Somit ergeben sich zwei Forderungen in Form des…

➔ **Gestaltungsgrundsatz 3:**
Auftragsanonyme Puffer sowie gesplittete Fertigungsaufträge innerhalb der Fertigung sind zu vermeiden.

4. Erkenntnis: Fertigungsregelung erfolgt ohne Führungsgrösse

Die Kanban-, BOA-, Conwip-, Polca- und DBF-Verfahren regeln die Bestände. Bei den entsprechenden Wirkprinzipien handelt es sich allerdings jeweils um eine Limitierung der Bestände in Form einer Bestandsgrenze pro Arbeitssystem oder einer definierten Anzahl Autorisierungskarten, welche die maximale Anzahl freigegebener Fertigungsaufträge festlegt. Sowohl die Bestandsgrenze als auch die Anzahl Karten wird durch eine zentrale Stelle (Planung) festgelegt. Die Aktualität der definierten Bestandslimiten respektive der fortlaufende Abgleich mit der effektiven, schwankenden Belastung des Fertigungssystems erfolgt nicht in regelmässigen, kurzen Zeitabständen. Im Falle der DBF kann die Bestandsgrenze auch durch die Mitarbeiter vor Ort festgelegt werden, was den Bezug zur tatsächlichen Leistungsnachfrage an den einzelnen Arbeitssystemen verschleiern kann.

Das Unterschreiten der maximalen Bestandsvorgabe an einem Arbeitssystem ist ein Ergebnis von fehlenden Fertigungsaufträgen aufgrund einer sinkenden Marktnachfrage oder aufgrund einer Marktnachfrage, die nicht explizit auf das betrachtete Arbeitssystem zutrifft. Dieses Ereignis löst keine spezifischen Aktionen aus – es resultiert nach Abarbeiten der Warteschlange nach dem FIFO-Prinzip ein „Warten auf Arbeit“. Der Grund für das Ausbleiben einer Aktion ist der Einsatz einer Maximalgrösse anstelle einer Führungsgrösse im Verständnis der Regelungstechnik gemäss Abschnitt 3.1. Bei positiven wie auch negativen Abweichungen der Regelgrösse Bestand von der Führungsgrösse (Regeldifferenzen) löst die Stelleinrichtung entsprechende Aktionen aus.

➔ **Gestaltungsgrundsatz 4:**
Eine Fertigungsregelung im Verständnis der Regelungstechnik erfordert eine Führungsgrösse, damit bei positiven und negativen Regeldifferenzen Stellgrössen festlegt werden können.

5. Erkenntnis: Auftragsdringlichkeiten sind entweder terminiert oder werden durch ein Reihenfolgeprinzip wie beispielsweise FIFO festgelegt

Jedes der vorgestellten Steuerungsverfahren, das die Fertigungsaufträge freigibt und nicht erzeugt, benötigt für die Freigabe des Fertigungsauftrags einen geplanten Starttermin. Der geplante Starttermin kann auch „sofort“ lauten. Die Freigabe der Fertigungsaufträge kann mit zusätzlichen Entscheidungskriterien kombiniert sein. Zur Ermittlung des Planstarttermins benötigt die übergeordnete Planung Übergangszeiten (in der Regel inkl. Sicherheiten), die in Form von Stammdaten verfügbar sind.

Für einen freigegebenen Fertigungsauftrag, der entsprechend dem verwendeten Verfahren über keine terminierten Arbeitsvorgänge verfügt, ist das einzige Bewertungskriterium hinsichtlich seiner Dringlichkeit innerhalb einer Warteschlange vor einem Arbeitssystem, der Zeitpunkt seines Eintritts in diese Warteschlange (z.B. FIFO-Prinzip). In dem Falle wurde vor der Freigabe des Ferti-

gungsauftrags ein Sollstarttermin des Fertigungsauftrags in Abhängigkeit des Sollendtermins ermittelt. Nach erfolgter Freigabe verfügt der Fertigungsauftrag über keinen weiteren Solltermin (mit Ausnahme des Sollendtermins).

Dieser Sollendtermin des Fertigungsauftrags kann ein Beurteilungskriterium sein (Voraussetzung Gestaltungsgrundsatz 3 gilt). Allerdings kann das alleinige Urteilen aufgrund dieses Termins zu falschen Schlussfolgerungen führen, da die verschiedenen Fertigungsaufträge in einer Warteschlange bei einem Variantenfertiger in der Regel eine unterschiedliche Anzahl offener, noch nicht ausgeführter, Arbeitsvorgänge bzw. -inhalte ausweisen. Dadurch resultieren – trotz identischer Sollendtermine – unterschiedliche Dringlichkeiten.

Aus dieser Erkenntnis resultiert folgender Gestaltungsgrundsatz für eine Steuerungs- und Regelungsstrategie:

→ **Gestaltungsgrundsatz 5:**
Die Dringlichkeit eines Fertigungsauftrags muss jederzeit, unmittelbar und unabhängig von Planterminen feststellbar sein.

Somit wurden fünf Gestaltungsgrundsätze formuliert, die bei der Entwicklung einer Steuerungs- und Regelungsstrategie zu berücksichtigen sind. In Abschnitt 6.5 erfolgt die Diskussion, ob und wie die geforderten Gestaltungsgrundsätze in der entwickelten Steuerungs- und Regelungsstrategie integriert sind.

4. Entwurf einer Fertigungssteuerung und –regelung

4.1. Die Idee

Das MRPII-Verfahren gilt als das am meisten verbreitete Verfahren [LÖD08] und gehört zu den Verfahren der Auftragsfreigabe (siehe Abschnitt 3.4.1). *Damit der Entwurf über eine breite Praxiskompatibilität verfügt muss er sich also nach den Verfahren der Auftragsfreigabe richten.* Das bedeutet, die zu entwickelnden Strategie zur Steuerung und Regelung von Fertigungssystemen muss sich an dem Verständnis der Liste mit Fertigungsaufträgen als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung gemäss Abbildung 4 orientieren. Die in der Auftragsliste enthaltenen Informationen werden als Input für die Steuerung verstanden und die darin aufgeführten Fertigungsaufträge gilt es umzusetzen.

Sämtliche Steuerungsverfahren, welche zu der Gruppe der auftragsfreigebenden Verfahren gehören, benötigen eine Durchlaufterminierung. Bei einigen Verfahren reicht es aus, den Planstarttermin der Fertigungsaufträge zu ermitteln, nach welchem das Verfahren diese freigibt. Unabhängig davon erfolgt die Ermittlung der Planzeitpunkte in der Planung und basiert in der Regel auf statischen Stammdaten.

Mit Hilfe der Produktionskennlinie in Abschnitt 2.5 wurde gezeigt, dass die Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs d_{AVG} an einem Arbeitssystem vom aktuellen Betriebspunkt (offener Arbeitsvorrat) des Arbeitssystems abhängt, falls die Bearbeitungsreihenfolge nach dem FIFO-Prinzip erfolgt. So betrachtet ist die Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags d_{FA} ein Ergebnis der Betriebspunkte jener Arbeitssysteme, die durch den Fertigungsauftrag durchlaufen werden. Diese Betriebspunkte hängen vom Zeitpunkt ab, zu welchem sich der Fertigungsauftrag im Bestand des Arbeitssystems befindet. Die mittlere Reichweite der Arbeitssysteme ist durch den mittleren Bestand des Arbeitssystems festgelegt. Diese Information ist jederzeit verfügbar und entspricht aus Sicht des Fertigungsauftrags der mittleren Durchlaufzeit. Mit diesen Informationen kann ein Arbeitssystem quasi autonom die Dringlichkeit der Fertigungsaufträge ermitteln und die Bearbeitungsreihenfolge unabhängig von einer zentralen Stelle festlegen (siehe Abschnitt 4.4.1). Anstelle der planerischen Übergangszeiten werden die aktuell effektiven Übergangszeiten verwendet und der Bedarf an Stammdaten, insbesondere auch deren Pflege, reduziert sich.

Einige der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Steuerungsverfahren, welche nach dem Prinzip der Auftragsfreigabe funktionieren, verfügen über regelungstechnische Ansatzpunkte:

- Das BOA-Verfahren berücksichtigt für die Auftragsfreigabe den geplanten Starttermin sowie die Differenz zwischen den Belastungsschranken der Arbeitssysteme und dem Füllgrad der Belastungskonten (welcher durch einen Abzinsungsfaktor korrigiert wird je weiter die Bearbeitung in der Zukunft liegt). Nach erfolgter Auftragsfreigabe läuft die Bearbeitung an den einzelnen Arbeitssystemen nach dem FIFO-Prinzip ab.

  ➔ die Belastungsschranken der Arbeitssysteme *limitieren* den maximal offenen Arbeitsvorrat

- Das Conwip-Verfahren gibt einen Fertigungsauftrag aufgrund seines erreichten Planstarttermins und einer freien Autorisierungskarte frei. Die Vorgabe der planerischen Instanz – in Form der Anzahl Karten – entspricht der Maximalmenge von sich in Bearbeitung befindenden Fertigungsaufträgen. Nach erfolgter Auftragsfreigabe läuft die Bearbeitung an den einzelnen Arbeitssystemen nach dem FIFO-Prinzip ab.

  ➔ die Anzahl Karten *limitiert* die maximale Anzahl freigegebener Fertigungsaufträge

- Das POLCA-Verfahren funktioniert analog dem Conwip-Verfahren. Es unterscheidet sich hauptsächlich darin, dass die POLCA-Karte nicht fest dem Fertigungsauftrag sondern einem Paar von Fertigungsinseln zugeordnet ist. Neben einem Planstarttermin für den Fertigungsauftrag benötigt das POLCA-Verfahren zusätzlich einen Planstarttermin pro Fertigungsinsel resp. –segment.

  ➔ die Anzahl Karten limitiert die maximale Anzahl freigegebener Fertigungsaufträge

- Die DBF (Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung) gibt einen Fertigungsauftrag ebenfalls anhand des geplanten Starttermins und der Belastungsschranke des ersten Arbeitssystems frei. Die Bearbeitungsreihenfolge entspricht dem FIFO-Prinzip, von welchem abgewichen wird, falls das nachfolgende Arbeitssystem die Bearbeitung eines Fertigungsauftrags aufgrund der erreichten Belastungsschranke blockiert.

  ➔ die Belastungsschranken der Arbeitssysteme limitieren den maximal offenen Arbeitsvorrat

Die Gemeinsamkeit dieser Verfahren hinsichtlich der regelungstechnischen Funktionalitäten besteht darin, dass sie eine Limitierung des Umlaufbestands durch eine maximale Vorgabe einhalten. Es handelt sich allerdings nicht um eine Führungsgrösse im Verständnis der Regelungstechnik nach Abschnitt 3.1. Die maximale Vorgabe wird durch die Planung statisch festgelegt und stellt somit auch keinen direkten Bestandteil der Steuerungsfunktionalität dar.

Die auszuführenden Fertigungsaufträge sind bekannt und in der Auftragsliste zusammengefasst. Damit kann der Leistungsbedarf pro Arbeitssystem und Periode ermittelt werden (siehe Abschnitt 4.4.3). Wiederum mit Hilfe der Produktionskennlinie ist es möglich, anhand des Leistungsbedarfs (mittlere Leistung) den mittleren Bestand des Arbeitssystems zu berechnen. Das Ergebnis, der berechnete mittlere Bestand, dient einerseits als Führungsgrösse für das Arbeitssystem und stellt andererseits einen direkten Bezug zur Auftragsliste dar. Somit ist auch die Berücksichtigung der aktuellen Marktsituation hergestellt (siehe Abschnitt 2.3.5, letzter Satz), da die Fertigungsaufträge in der Auftragsliste als Abbild der Marktnachfrage aufgefasst werden können.

Somit lässt sich der Ansatz für den Entwurf folgendermassen zusammenfassen: jedes Arbeitssystem verfügt über einen individuellen Steuerbestand, der durch die Steuerung in regelmässigen Abständen, quasi dynamisch, berechnet wird. Die Berechnung erfolgt anhand der auszuführenden Fertigungsaufträge, welche im weiteren Sinne den Absatzmarkt wiederspiegeln. Dieser Steuerbestand dient als Führungsgrösse des Arbeitssystems zur Regelung der Arbeitsintensität durch das Arbeitssystem. Die Bearbeitungsreihenfolge der Warteschlange wird unabhängig von einer Planung durch das Arbeitssystem, anhand der Dringlichkeit der Fertigungsaufträge, vorgenommen.

Die strukturelle Auslegung der Aufgabenverantwortung gliedert sich in sowohl zentrale als auch dezentrale Komponenten. Die Funktionalitäten sind vollumfänglich dem Teilgebiet der Steuerung zugeordnet (siehe Abbildung 4):

- Die Ermittlung des Steuerbestands erfolgt zentral anhand der Fertigungsauftragsliste. Sie wird als Steuerung verstanden und legt für jedes Arbeitssystem einen lastspezifischen Betriebspunkt für einen bestimmten Zeitraum fest.
- Den vorgegebenen Betriebspunkt gilt es durch das Arbeitssystem mittels einer Selbststeuerung zu halten. Selbststeuerung wird als Fähigkeit und Möglichkeit interagierender Systemelemente zum autonomen Treffen von zielgerichteten Entscheidungen verstanden [SCH06]. Die Selbststeuerung wirkt demzufolge dezentral unter Berücksichtigung eines gesamtheitlichen Kontextes und soll nach Grundsätzen der Regelungstechnik realisiert werden.

4.2. Der Entwurf in der Morphologie

Die Idee des Entwurfs einer Fertigungssteuerung wird in Abbildung 49 in derselben Morphologie dargestellt, wie sie in Abschnitt 3.4. zur Vorstellung der Steuerungsverfahren verwendet wurde.

	Merkmale	Merkmalsausprägungen				
1.	Quelle der Fertigungsaufträge	Verfahren der Auftragserzeugung	**Verfahren der Auftragsfreigabe**	andere Verfahren		
2.	Entscheidungsfindung AVG-Bearbeitung	zentrale Entscheidungsfindung	dezentrale Entscheidungsfindung	**kombinierte Entscheidungsfindung**	andere Entscheidungsfindung	
3.	Terminierte Arbeitsvorgänge notwendig	ja	**nein**	nur Starttermin des 1. AVG	andere	
4.	Freigabe des Fertigungsauftrags	sofort (bei Auftragserzeugung)	nach Dringlichkeit (Termin)	**nach Dringlichkeit (nicht Termin)**	**bestandsbedingt**	andere
5.	Auftragspriorität	keine (FIFO)	geplante	**zustandsbedingte**	andere	
6.	Ermittlung der Regelgrössen	keine	periodisch (zeitgetrieben)	**periodisch (ereignisorientiert)**	kontinuierlich	andere
7.	Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung	keine	in der Planung	**in der Steuerung**	andere	

Abbildung 49: Darstellung der Steuerungsfunktionalitäten des Entwurfs einer Fertigungssteuerung und –regelung im morphologischen Schema

Dass sich der Entwurf am Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung gemäss Abschnitt 2.1 orientiert ergibt sich aus dem Anspruch einer breiten Einsatzmöglichkeit in der Praxis. Somit handelt es sich um ein Verfahren der Auftragsfreigabe (siehe Abbildung 49, 1. Merkmal). Dadurch ist sichergestellt, dass das Verfahren mit Prognose-, Verbrauchs- und Kundenaufträgen gleichzeitig umgehen kann. Dass es sich um eine kombinierte Entscheidungsfindung handelt (siehe Abbildung 49, 2. Merkmal) geht auf die Formulierung der Aufgabenstellung zurück und ist in der Idee des Entwurfs in Abschnitt 4.1 explizit enthalten. Sowohl die Fertigungsauftragsfreigabe als auch die Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge bedingen keine Terminierung der Arbeitsvorgänge, sondern erfolgen unter Berücksichtigung der aktuellen Bestandssituation in der Fertigung und somit aufgrund der benötigten Durchlaufzeit (siehe Abbildung 49, 3., 4. und 5. Merkmal). Die Ermittlung der Regelgrössen wird jeweils durch das Ereignis „Fertigstellung eines Arbeitsvorgangs“ angestossen (siehe Abbildung 49, 6. Merkmal). Solange ein Arbeitssystem mit der Bearbeitung eines Arbeitsvorgangs beschäftigt ist, ist die Aktualisierung der Regelgrössen nicht notwendig, da eine Entscheidung frühestens nach Beenden der Bearbeitung anfällt. Die Voraussetzungen zur Kapazitätssteuerung sind direkt in der Steuerung vorhanden (siehe Abbildung 49, 7. Merkmal). Gemäss der Idee in Abschnitt 4.1 wird periodisch der Steuerbestand pro Arbeitssystem auf Basis des effektiven Leistungsbedarfs ermittelt. Somit sind die Voraussetzungen geschaffen, pro Arbeitssystem den Leistungsbedarf mit der zur Verfügung stehenden Kapazität abzugleichen und im Rahmen zu definierender Regeln anzupassen.

4.3. Das Arbeitssystem - Analyse der dezentralen Stellen

Um die Funktionsweise der zugrunde liegenden Idee (siehe Abschnitt 4.1) und des in der Morphologie vorgestellten Entwurfs (siehe Abschnitt 4.2) im Detail herzuleiten, wird in diesem Abschnitt das dezentrale Element, das Arbeitssystem, analysiert. Dabei werden zuerst die materialflusstechnischen Beziehungen eines Arbeitssystems beschrieben (siehe Abschnitt 4.3.1) und dar-

auf aufbauend die notwendigen Aufgaben (Funktionen) hergeleitet (siehe Abschnitt 4.3.2), welche notwendig sind, um die Idee zu realisieren. Die Analyse schliesst mit der Festlegung, zu welchen Zeitpunkten die Aufgaben durchgeführt werden müssen (siehe Abschnitt 4.3.3).

4.3.1. Beziehungen eines Arbeitssystems

In der Abbildung 50 ist ein Fertigungsbereich in abstrahierter Weise abgebildet. Das Beispiel besteht aus fünf Arbeitssystemen und verfügt über eine Quelle und eine Senke sowie drei externe Dienstleister. Die externen Dienstleister führen Arbeitsvorgänge im Auftrag der Unternehmung durch. Damit die Fertigungsaufträge von der Quelle zur Senke gelangen sind Transporte zwischen den Elementen erforderlich.

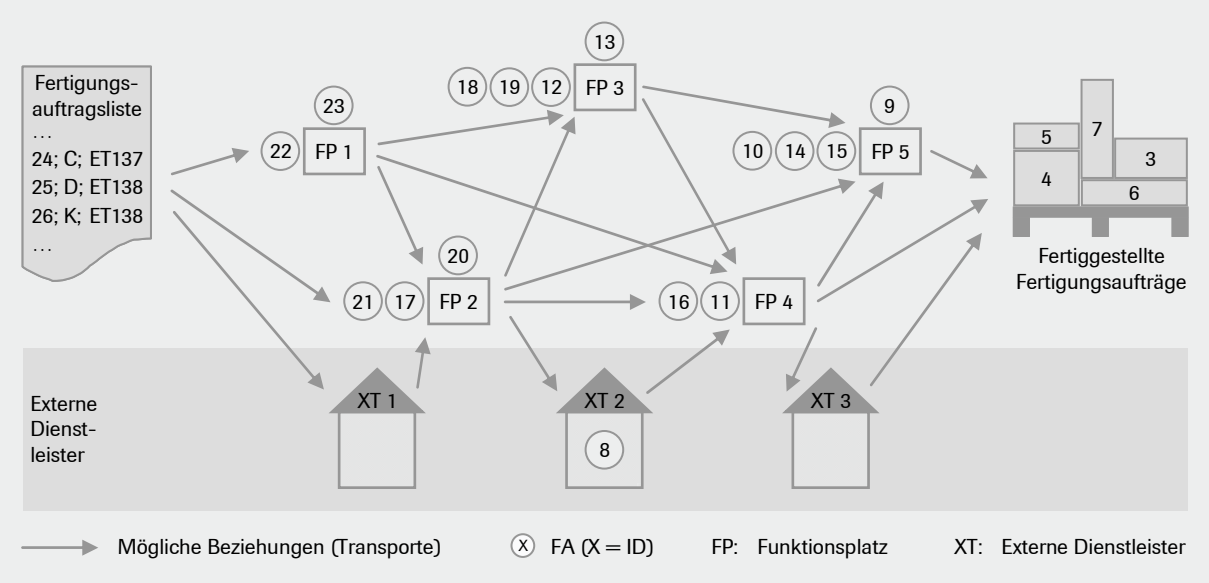


Abbildung 50: Fertigungsbereich bestehend aus den Elementen Arbeitssystem, Quelle, Senke und externen Dienstleistern sowie möglichen Beziehungen in Form von Transporten dazwischen

Die Fertigungsauftragsliste stellt die Quelle des Fertigungsbereichs dar. Sie ist gemäss Abschnitt 2.1 als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung ausgestaltet. Die darin enthaltenen Fertigungsaufträge verfügen über einen Wunschendtermin und eine Operationsreihenfolge. Pro Operationsschritt ist das ausführende Arbeitssystem und die Auftragszeit d_{ZAU} bekannt.

Jedes Arbeitssystem (AS) setzt sich aus einem Funktionsplatz und der dazugehörenden Warteschlange zusammen (siehe Abbildung 8, Abschnitt 2.3.1). Die für das Arbeitssystem relevanten Informationen wie z.B. die Auftragszeit jener Fertigungsaufträge, die sich gegenwärtig gerade in der Warteschlange befinden, sind in der Fertigungsauftragsliste enthalten.

Um den Entwurf realistisch zu gestalten, ist es erforderlich, auch Fertigungsschritte zu berücksichtigen, die durch Dritte durchgeführt werden. Die Vergabe an Dritte kann technologisch oder kapazititv bedingt sein. Die externen Dienstleister (XT) führen analog den Arbeitssystemen Arbeitsvorgänge des Fertigungsauftrags durch. *Sie stellen steuerungstechnisch kein Element des Fertigungsbereichs dar*. In der Praxis ist es üblich, dass für Arbeitsvorgänge, welche ausserhalb „des Hauses“ durchgeführt werden, eine feste Durchlaufzeit d_{AVG} angenommen wird. Sie sollte Gegenstand der betrieblichen Vertragsbedingungen mit dem Dienstleister darstellen. Transportzeiten sind in dieser Durchlaufzeit enthalten.

Diese feste Durchlaufzeit entspricht beim Arbeitssystem der Summe aus Übergangszeit und Auftragszeit. Im Unterschied zur Bearbeitung durch ein Arbeitssystem fällt bei der Bearbeitung durch

einen externen Dienstleister aus Sicht Fertigungssystem kein nachweisbares „Liegen vor/nach Bearbeitung“ an (siehe Abbildung 5 in Abschnitt 2.2.1). Deshalb ist es notwendig, das Arbeitssystem und den Dienstleister durch unterschiedliche Elemente darzustellen.

Die Senke wird in Abbildung 50 durch eine Palette mit beendeten Fertigungsaufträgen symbolisiert. Sobald ein Fertigungsauftrag durch das letzte Arbeitssystem bearbeitet wurde wird er auf diese Palette umgelagert. In der Praxis kann diese Palette zum Beispiel der Spedition entsprechen, in welcher die Fertigwaren für den Transport verpackt und bereitgestellt werden (falls dieser Arbeitsvorgang im Rahmen der Abgrenzung nicht durch ein Arbeitssystems dargestellt wird).

Mit den Beziehungen eines Arbeitssystems sind die materialflusstechnischen Verknüpfungen mit möglichen Vorgängern und Nachfolger zu verstehen (in Abbildung 50 sind diese mit ausgezogenen Pfeilen dargestellt). Die Umsetzung dieser Beziehungen erfolgt in Form von Transporten. Die zeitliche Definition eines Transports bedingt dessen Startzeitpunkt und Dauer.

Im Rahmen der Abstraktion eines allgemeingültigen Fertigungsbereichs verfügt ein Arbeitssystem nach Abbildung 50 über drei mögliche Arten von Vorgängern (jeweils mit der möglichen Anzahl):

- 0..n Arbeitssysteme (AS)
- 0..n externe Dienstleisterstellen (XT)
- 0..1 Quelle (Fertigungsauftragsliste)

Analog gilt für die möglichen Nachfolgerarten eines Arbeitssystems (wiederum mit der jeweils möglichen Anzahl):

- 0..n Arbeitssysteme (AS)
- 0..n externe Dienstleister (XT)
- 0..1 Senke (Fertigwarenpalette)

Die eben aufgelisteten Verknüpfungsmöglichkeiten aus Sicht Materialfluss sind in Abbildung 51 zusammengefasst. Diese Zusammenstellung wird im folgenden Abschnitt 4.3.2 behilflich sein, die durch ein Arbeitssystem auszuführenden Aufgaben auf Vollständigkeit zu prüfen.

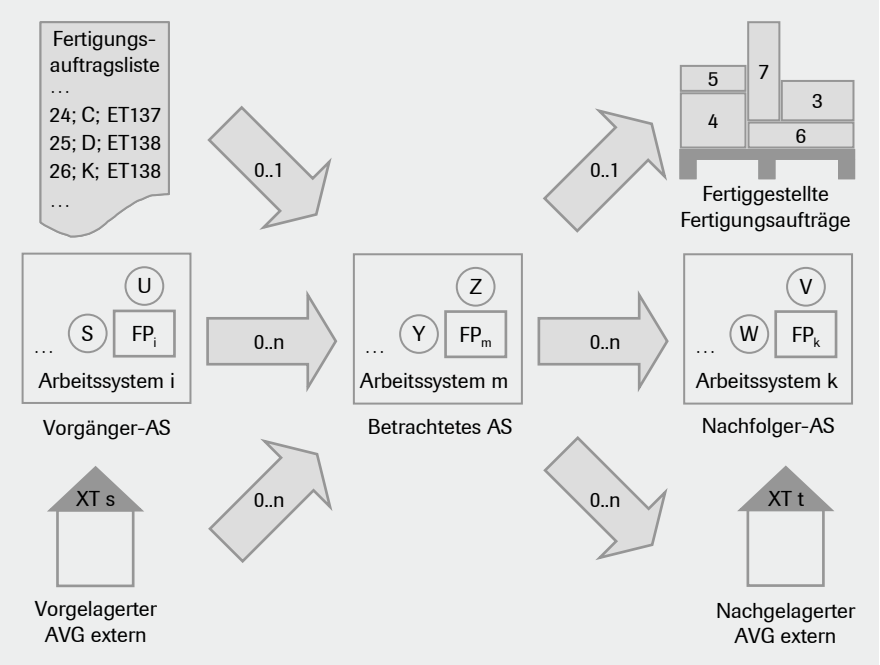


Abbildung 51: Materialflusstechnische Beziehungen (Transporte) eines Arbeitssystems m in Form von möglichen Vorgängern und Nachfolger

4.3.2. Aufgaben eines Arbeitssystems

Aus der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Idee eines Steuerungs- und Regelungsverfahren und der Darstellung derselben in der Morphologie in Abbildung 49 (siehe Abschnitt 4.2) lassen sich die Aufgaben eines Arbeitssystems ableiten. Sie lauten:

- A1: Prüfe, ob ein Fertigungsauftrag ausgelöst werden soll (Freigabe ab Fertigungsauftragsliste)
- A2: Prüfe, ob gearbeitet werden soll
- A3: Prüfe, welcher Fertigungsauftrag als nächstes bearbeitet werden soll

Die Verantwortung der Auftragsumsetzung soll möglichst an die operativen Stellen übergehen, da dort die Wertschöpfung stattfindet [DIC09]. Dies wird mittels Dezentralisierung erreicht. Der Vorteil dezentraler Entscheidungskompetenz ist die Möglichkeit, schneller auf lokale Entwicklungen reagieren zu können. Um die oben aufgeführten Aufgaben A1 bis A3 in einem ganzheitlichen Kontext durchführen zu können sind entsprechende Hilfs- und Informationsmittel notwendig, auf welche die dezentralen Stellen (Arbeitssysteme) zugreifen können. Sie werden im Abschnitt 4.4 eingeführt. Im Abschnitt 4.5 wird erläutert, wie die hier aufgeführten Aufgaben mit diesen Hilfs- und Informationsmitteln gelöst werden.

4.3.3. Zeitpunkte der Aufgabendurchführung

Entscheidend für ein Steuerungsverfahren ist der Zeitpunkt, zu welchem die Entscheide gemäss Abschnitt 4.3.2 gefällt werden. Stellt man die Randbedingung auf, dass *ein „sich in Bearbeitung befindender AVG nicht unterbrochen werden darf“*, so reduziert sich die Anzahl Zeitpunkte, zu welchen eine Entscheidung gefällt werden muss. Die Durchführung der aufgelisteten Aufgaben A1 bis A3 in Abschnitt 4.3.2 ist lediglich zu den Zeitpunkten erforderlich, an denen das Bearbeitungsende eines Arbeitsvorgangs vorliegt. Nur zu diesen Zeitpunkten kann ein Ergebnis aus A1 bis A3 das Arbeitsverhalten des Arbeitssystems beeinflussen. Es handelt sich um *ereignisgetriebene* Zeitpunkte. Ohne die formulierte Randbedingung müsste die Prüfung der Aufgaben A1 bis A3 kontinuierlich durchgeführt werden.

Die gestellte Randbedingung kommt insbesondere in den Fällen zum Tragen, in welchen Fertigungsaufträge mit grossen Stückzahlen (und in der Regel langen Auftragszeiten) in die Fertigungsauftragsliste eingetragen werden. Die Absicht ist es, den Rüstaufwand zu minimieren. Dabei entsteht das Risiko, dass ein solcher Fertigungsauftrag einen Funktionsplatz unverhältnismässig lange beansprucht und um den Funktionsplatz konkurrierende Fertigungsaufträge am Durchfluss hindert. In der Praxis kann die Folge sein, dass solche Arbeitsvorgänge vor Fertigstellung abgebrochen werden, um mit der Bearbeitung von anderen, dringenderen Fertigungsaufträgen zu beginnen. Solche Eingriffe (wie im letzten Abschnitt von 3.4.1 beschrieben) sind durch die Planung nicht vorgesehen. Ausserdem kann der Fertigungsauftrag, dessen Bearbeitung des Arbeitsvorgangs unterbrochen wurde, systemtechnisch nicht eindeutig erfasst werden.

4.4. Schlüsselelemente des Verfahrens

Im Abschnitt 4.3.2 wurden die Aufgaben A1 bis A3 aufgelistet, welche durch die Arbeitssysteme durchgeführt werden müssen. Es wurde dabei darauf hingewiesen, dass dazu Hilfs- und Informationsmittel zur Verfügung stehen müssen. In diesem Abschnitt werden diese vorgestellt.

4.4.1. Der Prio-Quotient

Im Abschnitt 4.1 wurde im Rahmen der Idee die Forderung aufgestellt, dass die Arbeitssysteme die Bearbeitungsreihenfolge ihrer Warteschlangen autonom festlegen. Falls die Arbeitsvorgänge der Fertigungsaufträge nicht terminiert werden, was der Idee entspricht, entfällt die Einsatzmöglichkeit der Schlupfzeit-Regel (kürzeste verbleibende Zeit bis zum Sollendtermin des AVG) aufgrund des eingeschlagenen Lösungswegs. Es verbleiben lediglich die Prioritätsbestimmungsmöglichkeiten FIFO (First In – First Out), LIFO (Last In – First Out), KOZ (kürzeste Operationszeit) und LOZ (längste Operationszeit) zur autonomen Reihenfolgebildung. Diese Logiken haben u.a. gemeinsam, dass sie die wahre Dringlichkeit des Fertigungsauftrags nicht berücksichtigen (können).

Ein Mass für die Dringlichkeit der Fertigungsaufträge ist das Verhältnis aus verbleibender Zeit bis zum Endtermin des Auftrags und benötigter Zeit bis zur Fertigstellung des Auftrags. Dieses Verhältnis wird in der Folge *Prio-Quotient des Fertigungsauftrags* Q_{FA} genannt (kurz *Prio-Quotient*).

$$Q_{FA} = \frac{d_{FA\ rest}}{d_{FA\ dyn}} \tag{4.1}$$

mit $d_{FA\ rest}$ Verbleibende Dauer bis zum Endtermin des FA [BKT]

$d_{FA\ dyn}$ Dynamische Durchlaufzeit des FA [BKT]

In der Erklärung von $d_{FA\ rest}$ in (4.1) wird bewusst der Ausdruck Endtermin des FA anstelle des vielfach verwendeten Begriffs *Planendtermin des FA* benutzt. Damit soll die potentielle Assoziation mit einem durch die Planung ermittelten Endtermin vermieden werden – es handelt sich um den durch die Planung *vorgegebenen* Endtermin des Fertigungsauftrags. Die Art und Weise der Festlegung dieses Endtermins ist für die Steuerung unbedeutend. Im Falle von z.B. Kundenaufträgen resultiert der Termin aus dem Wunschliefertermin des Kunden resp. dem mit dem Kunden vereinbarten Liefertermin. Die verbleibende Dauer bis zum Endtermin des FA ist jederzeit ermittelbar:

$$d_{FA\ rest} = \frac{t_{Endter\min} - t_{aktuell}}{d_{BKT}} \tag{4.2}$$

mit $t_{Endter\min}$ Zeitpunkt des Endtermins des FA [BKT]

$t_{aktuell}$ Momentaner Zeitpunkt [BKT]

d_{BKT} Dauer eines BKT [h]

Der Zeitpunkt „Tag“ des Endtermins des FA ist durch den Sollendtermin des FA festgelegt. Die „Uhrzeit“ derselben Grösse wird durch das Schichtende des FP definiert, der den letzten AVG durchführt. Diese kann in einem Betrieb mit unterschiedlichen Schichtmodellen variieren.

Der Ausdruck *dynamisch* in $d_{FA\ dyn}$ bringt zum Ausdruck, dass die resultierende Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags von den Bestandssituationen der noch zu durchlaufenden Arbeitssysteme abhängt. Dadurch wird der Zustand dieser Arbeitssysteme berücksichtigt. Für die Ermittlung der dynamischen Durchlaufzeit des FA wird angenommen, dass die Warteschlangen vor den FP nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die Übergangszeiten dadurch unabhängig von den individuellen Auftragszeiten der AVG sind [NYH03]. In derselben Quelle wird gezeigt, dass die individuelle Durchlaufzeit linear mit dem Arbeitsinhalt steigt. Die dynamische Durchlaufzeit setzt sich aus den unterschiedlichen Durchlaufzeiten der AVG zusammen. Somit gilt es neben der effektiven Auftragszeit auch die gegenwärtige Reichweite der zu durchlaufenden AS zu berücksichtigen. Die Berechnung der dynamischen Durchlaufzeit unterscheidet

sich in Abhängigkeit davon, ob der Fertigungsauftrag bereits freigegeben wurde und sich physisch im Fertigungssystem befindet (Bestand, WIP) oder nicht:

$$d_{FA\,dyn} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} (R_j + \frac{d_{ZAU\,i\,j}}{L_{\max\,j}}) & , Freigabe_{FA} = false \\ \frac{1}{2} \cdot R_j + \sum_{i=n-k}^{n} (R_j + \frac{d_{ZAU\,i\,j}}{L_{\max\,j}}) & , Freigabe_{FA} = true \end{cases} \tag{4.3}$$

mit i Operationsfolgenummer [-]

k Tiefste Operationsfolgenummer des FA mit nicht beendetem AVG [-]

n Anzahl Operationsfolgenummern des FA [-]

j Das zur i-ten oder k-ten Operationsfolgenummer gehörende AS [-]

$d_{ZAU\,i\,j}$ Auftragszeit des i-ten AVG am AS_j [h]

Die Unterscheidung von Operationsfolgenummer i und Arbeitssystemidentifikation j ist notwendig, da ein FA ein AS mehrmals, eventuell mit unterschiedlichen Auftragszeiten, durchlaufen kann. Die Reichweite R_j des AS_j ist zu jedem Zeitpunkt durch (2.33) eindeutig gegeben. Falls der FA bereits freigegeben ist befindet er sich in der Warteschlange eines AS oder in Bearbeitung durch den entsprechenden FP (Operationsfolgenummer = k). Für die Berechnung von $d_{FA\,dyn}$ wird zwar die Bearbeitungsreihenfolge nach dem FIFO-Prinzip angenommen, die durch das AS effektiv festgelegte Reihenfolge kann allerdings davon abweichen. Aus diesem Grund ist die noch offene Wartezeit an dem AS, in dessen Warteschlange der FA sich gegenwärtig befindet, schwer ermittelbar. Deshalb wird zur Vereinfachung die Reichweite des entsprechenden AS halbiert (gemittelt aufgrund der Annahme einer Gleichverteilung).

a) Auszug aus der Fertigungsauftragsliste (Beispiel FA21)

FA	AS_{OP10}	$d_{ZAU(10)}$	AS_{OP20}	$d_{ZAU(20)}$	AS_{OP30}	$d_{ZAU(30)}$	AS_{OP40}	$d_{ZAU(40)}$	AS_{OP50}	$d_{ZAU(50)}$	AS_{OP60}	$d_{ZAU(60)}$	Endtermin
…	…												…
21	AS7	3.5	AS2	2.0	AS5	3.0	AS6	4.0	AS1	2.5			n
…	…												…

b) Grundelemente des Prio-Quotienten (am Beispiel FA21)

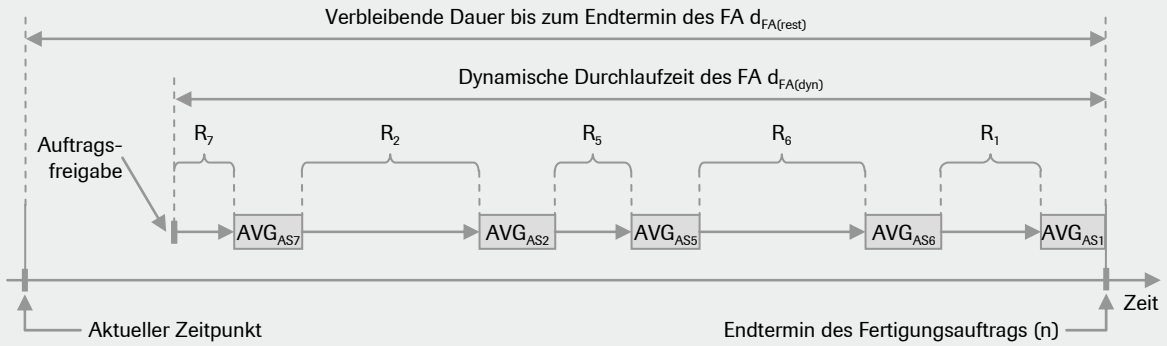


Abbildung 52: Auszug aus der Fertigungsauftragsliste (a) und der Prio-Quotient als Verhältnis von verbleibender Dauer des Fertigungsauftrags und der dynamischen Durchlaufzeit (b)

Diese Vereinfachung betrifft alle FA in derselben Warteschlange im selben Masse. Die Auftragszeit des FA wird in diesem Fall nicht dazu addiert, da sie im Bestand des AS enthalten ist und somit auch in der aktuellen Reichweite des AS berücksichtigt ist. Zum Zeitpunkt, zu welchem das AS die Aufgabe der Bearbeitungsreihenfolge durchführt und sich dazu an der Information des Prio-Quotienten bedient, befindet sich kein FA in Bearbeitung. Diese Tatsache ergibt sich aus der

Definition des Entscheidungszeitpunkts, der durch das Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG“ angestossen wird (siehe Abschnitt 4.3.3).

Der Prio-Quotient resp. der Inhalt von (4.2) und (4.3) ist in Abbildung 52 dargestellt. Als Beispiel ist ein FA gewählt, der aufgrund seines Operationsplans der Reihe nach das AS7, AS2, AS5, AS6 und AS1 zu durchlaufen hat. Diese Information sowie die entsprechenden Auftragszeiten d_{ZAU} sind in der Fertigungsauftragsliste enthalten. Zusätzlich ist auch der Sollendtermin des FA in der Fertigungsauftragsliste verfügbar (siehe Abbildung 52, a). Die Spalten ohne Einträge in Abbildung 52 a) vermitteln, dass der Operationsschritt 50 auf dem AS1 der letzte AVG im Operationsplan des FA 21 ist. Der untere Bildteil b) der Abbildung 52 zeigt die Zusammensetzung der beiden Hauptelemente des Prio-Quotienten.

Falls der Fertigungsauftrag nicht beendet ist, ergibt sich aus (4.3) sowie den Kenntnissen über die Produktionskennlinie in Abschnitt 2.5:

$$d_{FA\ dyn\ t} > 0 \tag{4.4}$$

mit t Beliebiger Zeitpunkt auf der Zeitachse [BKT]

Das Vorzeichen des Prio-Quotienten eines Fertigungsauftrags wird somit durch das Vorzeichen der verbleibenden Dauer bis zum Endtermin des FA $d_{FA(rest)}$ festgelegt. Dieses ergibt sich aus der Lage des aktuellen Zeitpunktes und des Sollendtermins des FA zueinander. Die möglichen Situationen sind in der Abbildung 53 qualitativ zusammengefasst.

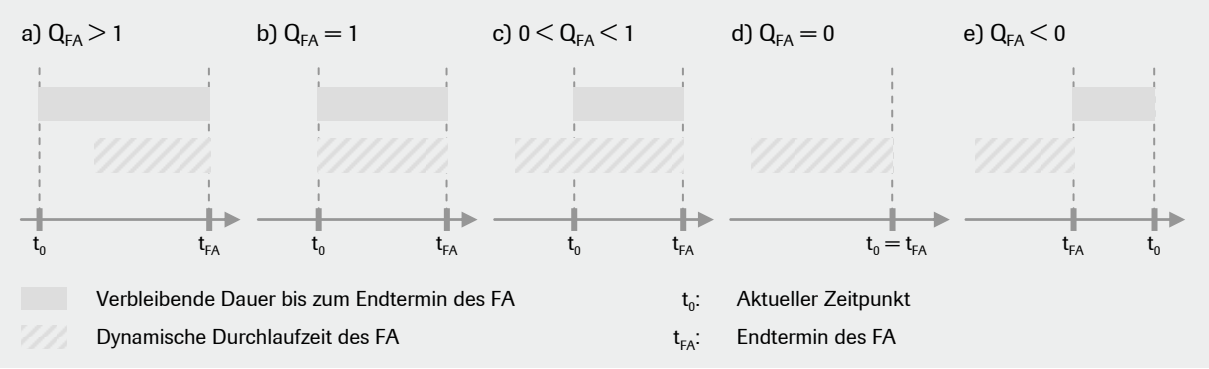


Abbildung 53: Der Prio-Quotient als Ergebnis von verbleibender Dauer und benötigter Dauer sowie der Abhängigkeit der relativen Lage vom aktuellen Zeitpunkt zum Sollendtermin des FA

$Q_{FA} \geq 1$ (Abbildung 53, a) und b)):

Der FA wird zu früh oder rechtzeitig fertiggestellt, sofern sich die Bestandssituation an den folgenden AS bis zum Durchlauf des FA nicht wesentlich verändert. Der absolute Wert ist gleichzeitig ein Indikator über den Grad der zu frühen Fertigstellung.

$0 < Q_{FA} < 1$ (Abbildung 53, c)):

Der Fertigungsauftrag wird mit Verspätung fertiggestellt, sofern sich die Bestandssituation an den folgenden AS bis zum Durchlauf des FA nicht wesentlich verändert und das FIFO-Prinzip an den einzelnen AS eingehalten wird. Eine Reduktion oder gar Elimination der voraussichtlichen Verspätung lässt sich realisieren, indem der FA am aktuellen und an den folgenden AS mit höherer Priorität behandelt wird. Eine solche Reihenfolgevertauschung (entgegen dem FIFO-Prinzip) erfolgt auf zeitliche Kosten der übrigen FA in der Warteschlange.

$Q_{FA} \leq 0$ (Abbildung 53, d) und e)):

Der Sollendtermin des FA ist erreicht resp. überschritten. Gleichzeitig verfügt der FA über noch nicht durchgeführte Arbeitsvorgänge. In diesem Falle lässt sich bestenfalls die bereits bestehende Verspätung des FA minimieren.

Der Prio-Quotient ist eine dimensionslose Grösse. Der resultierende Wert wird nicht gespeichert, da er einerseits unmittelbar nach der Berechnung keine Gültigkeit mehr hat (z.B. ändert sich die Bestandssituation an einem der folgenden AS) und weil er ausschliesslich zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung benötigt wird. Für die nächste Verwendung wird er neu berechnet. Die Berechnung wird ebenfalls durch das Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG“ angestossen (siehe Abschnitt 4.3.3).

4.4.2. Der Auftragsschlupf

Der Auftragsschlupf S_{FA} wird ergänzend zum Prio-Quotienten zur Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge durch die Arbeitssysteme eingesetzt. Die Grösse sagt aus, ob die verbleibende Dauer bis zum Endtermin des FA $d_{FA(rest)}$ die Fertigstellung des FA aus rein technischer Sicht zulässt. Die Definition ergibt die Einheit [h]:

$$S_{FA} = (d_{FA\,rest} \cdot d_{BKT}) - \sum_{i=k}^{n} d_{ZAU\,i} = t_{Endter\min} - t_{aktuell} - \sum_{i=k}^{n} d_{ZAU\,i} \tag{4.5}$$

mit i Operationsfolgenummer [-]

k Tiefste Operationsfolgenummer des FA mit nicht beendetem AVG [-]

n Anzahl Operationsfolgenummern des FA [-]

Befindet sich ein AVG in Bearbeitung durch den FP des AS wird der Auftragsschlupf nicht berechnet. Durch das Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG“ erhöht sich k um einen Zähler des bearbeiteten FA und die Berechnung des Auftragsschlupfs wird angestossen.

Das Vorzeichen des Auftragsschlupfs ist durch (4.1) und (4.5) für Prio-Quotienten grösser/gleich 1 oder kleiner/gleich 0 eindeutig festgelegt:

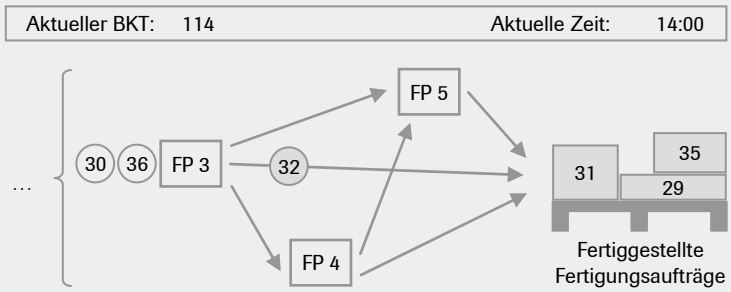
$$\begin{cases} Q_{FA} \geq 1 & , S_{FA} > 0 \\ 0 < Q_{FA} < 1 & , S_{FA} > 0 \vee S_{FA} < 0 \\ Q_{FA} \leq 0 & , S_{FA} < 0 \end{cases} \tag{4.6}$$

Für Prio-Quotienten mit einem Wert zwischen 1 und 0 kann nach (4.6) das Vorzeichen des Auftragsschlupfs sowohl positiv als auch negativ sein. Für diesen Wertebereich des Prio-Quotienten dient der Auftragsschlupf als zusätzliches Informationsmittel zur Aufgabenbearbeitung A3 „Prüfe, welcher Fertigungsauftrag als nächstes bearbeitet werden soll“ (siehe Abschnitt 4.3.2). Anhand eines Beispiels soll verdeutlicht werden, wie der Beizug des Auftragsschlupfs ergänzend zum Prio-Quotienten zu dieser Entscheidungsfindung beiträgt respektive diese beeinflusst.

Die Abbildung 54 a) zeigt die „letzten“ Arbeitssysteme eines Fertigungssystems, welche benötigt werden, um die Fertigungsaufträge fertig zu stellen. Es sind die Arbeitssysteme AS3, AS4 und AS5. Die Pfeile zwischen den AS und der Fertigwarenpalette repräsentieren die möglichen Materialflussbeziehungen. Diese sind durch die Operationspläne *aller* Fertigungsaufträge gegeben. Im Bildteil a) sind ausserdem der aktuelle BKT sowie die momentane Uhrzeit aufgeführt. Im Bildteil b) sind die Schichtmodelle der AS sowie die aktuellen Bestandssituationen zusammengefasst. Die

Reichweiten in der letzten Spalte der Tabelle sind durch die Bestände sowie die Produktionskennlinie (siehe Abschnitt 2.5) definiert. Der Bildteil c) enthält einen Ausschnitt der Fertigungsauftragsliste. Pro Operationsfolgenummer sind für jeden FA die AS-Identifikation sowie gemäss (2.3) die Auftragszeit in Stunden (Rüst- und Bearbeitungsdauer) angegeben. Zusätzlich wurde die Fertigungsauftragsliste um die Spalten „Prio-Quotient“ und „Auftragsschlupf“ ergänzt. In den letzten beiden Spalten der Fertigungsauftragsliste sind die verbleibende Dauer bis zum Endtermin sowie die dynamische Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge angegeben.

a) Ausschnitt Fertigungssystem und Datumsinformationen



b) Informationen zu Arbeitssystemen

AS-ID	Schichtstart	Schichtende	Bestand	Reichweite
...				
AS3	08:00	17:00	2.5	0.32
AS4	08:00	17:00	0	0.34
AS5	08:00	17:00	0	0.22
...				

c) Auszug aus der Fertigungsauftragsliste (ergänzt um zwei Spalten sowie den Hilfsgrössen für den Prio-Quotienten)

FA	...	AS_{OP50}	$d_{ZAU(50)}$	AS_{OP60}	$d_{ZAU(60)}$	AS_{OP70}	$d_{ZAU(70)}$	...	Endtermin	Q_{FA}	S_{FA}	$d_{FA(rest)}$	$d_{FA(dyn)}$
...	...								...				
30	...	AS3	1.5	AS4	4.0	AS5	1.0		114	0.1344	- 3.5	0.125	0.93
32	...	AS2	0	AS3	0				114	-	-	-	-
36	...	AS3	1.0	AS5	1.0				114	0.2551	1.0	0.125	0.49
...	...								...				

Abbildung 54: Situation im Fertigungsablauf, welche durch Berücksichtigung des Auftragsschlupfs zu einer anderen Bearbeitungsreihenfolge führt mit einem Ausschnitt aus dem Fertigungssystem mit Datumsangaben (a), Informationen zu den Arbeitssystemen (b) und einem Auszug aus der Fertigungsauftragsliste ergänzt mit den Grössen Prio-Quotient und Auftragsschlupf sowie der verbleibenden Dauer und der dynamischen Durchaufzeit des FA (c)

Zum aktuellen Zeitpunkt (14.00 Uhr am BKT 114) wird in Abbildung 54 die Bearbeitung des FA 32 (grauer Kreis) durch das AS3 soeben beendet. Der FA 32 befindet sich auf dem Weg zur Fertigwarenpalette (Senke), da die Operation 60 die letzte des FA 32 war (Operation 70 des FA 32 weist leere Zellen aus). Die Rüst- und Bearbeitungsdauer der Operation 60 sind entsprechend bereits auf Null gesetzt. Der FA 32 ist taggenau beendet worden (siehe Abbildung 54 c), Spalte „Endtermin“). Die Warteschlangen der AS4 und AS5 sind zu diesem Zeitpunkt leer, in der Warteschlange des AS3 befinden sich die FA 30 und 36. Beide FA sollen gemäss Fertigungsauftragsliste noch am BKT 114 beendet werden. Aufgrund der in der Fertigungauftragsliste enthaltenen Operationsschritte dieser FA und den dazugehörenden Auftragszeiten ist nachvollziehbar, dass die Bearbeitungsreihenfolge am AS3 entscheidend ist. Entweder werden beide FA verspätet fertig gestellt (Bearbeitungsreihenfolge von FA 30 vor FA 36) oder zumindest einer der beiden FA wird noch pünktlich beendet (Bearbeitungsreihenfolge FA 36 vor FA 30).

Das Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG“ am AS3 hat die Berechnung des Prio-Quotienten (4.1) und des Auftragsschlupfs (4.5) ausgelöst. Die resultierenden Werte sind für FA 30 und FA 36 in der Fertigungsauftragsliste in den entsprechenden Spalten eingetragen. Dieselben Werte für den FA 32 sind aufgrund des Bearbeitungsendes des FA auf null gesetzt.

Wird die Entscheidung der Bearbeitungsreihenfolge ohne Auftragsschlupf gefällt, so wird der FA 30 zuerst bearbeitet, da er den kleineren und somit dringenderen Prio-Quotienten ausweist. Bei-

de Fertigungsaufträge (FA 30 und FA 36) werden mit Verspätung fertiggestellt. Durch Einsatz des Auftragsschlupfs kann die Bearbeitungsreihenfolge entgegen der Sortierung nach aufsteigendem Prio-Quotienten anders ausfallen und mindestens der FA 36 kann noch zusätzlich zum FA 32 taggenau beendet werden. Ein solches Ergebnis resultiert, falls zuerst nach dem Vorzeichen des Auftragsschlupfs und anschliessend nach dem Wert des Prio-Quotienten sortiert wird.

4.4.3. Der Steuerbestand

Im Rahmen der vorgestellten Idee in Abschnitt 4.1 wurde festgelegt, dass die Arbeitsintensität der Arbeitssysteme auf Basis von regelungstechnischen Grundsätzen erfolgen soll. Der Bestand bietet sich als Regelgrösse an, da er zu jedem Zeitpunkt eindeutig ermittelbar ist und die Zielgrössen Leistung und Durchlaufzeit direkt beeinflusst (siehe Abschnitt 2.4.3, [WIE97], [LOE01], [NYH03], [LOE08]). Damit dies möglich ist, wird pro Arbeitssystem eine Führungsgrösse benötigt. Sie wird im Folgenden *Steuerbestand des Arbeitssystems* genannt (oder kurz *Steuerbestand*). Die Berechnung des Steuerbestands gliedert sich in zwei Vorgehensschritte:

- Berechnung der Leistungsanforderung für ein Arbeitssystem k
- Ableitung des Steuerbestands für ein Arbeitssystem k anhand der Leistungsanforderung

Berechnung der Leistungsanforderung für ein Arbeitssystem k

Bei der Ermittlung des Prio-Quotienten (siehe Abschnitt 4.4.1) werden die Fertigungsaufträge als Abfolge der Arbeitsvorgänge entlang der Zeitachse dargestellt (siehe Abbildung 52). Sie werden am Sollendtermin fixiert. Die längliche Ausdehnung (entgegen der Richtung der Zeitachse) ergibt sich aufgrund der entsprechenden Auftragszeiten sowie aufgrund der gegenwärtigen Bestandssituationen an den durch den Fertigungsauftrag zu durchlaufenden Arbeitssystemen.

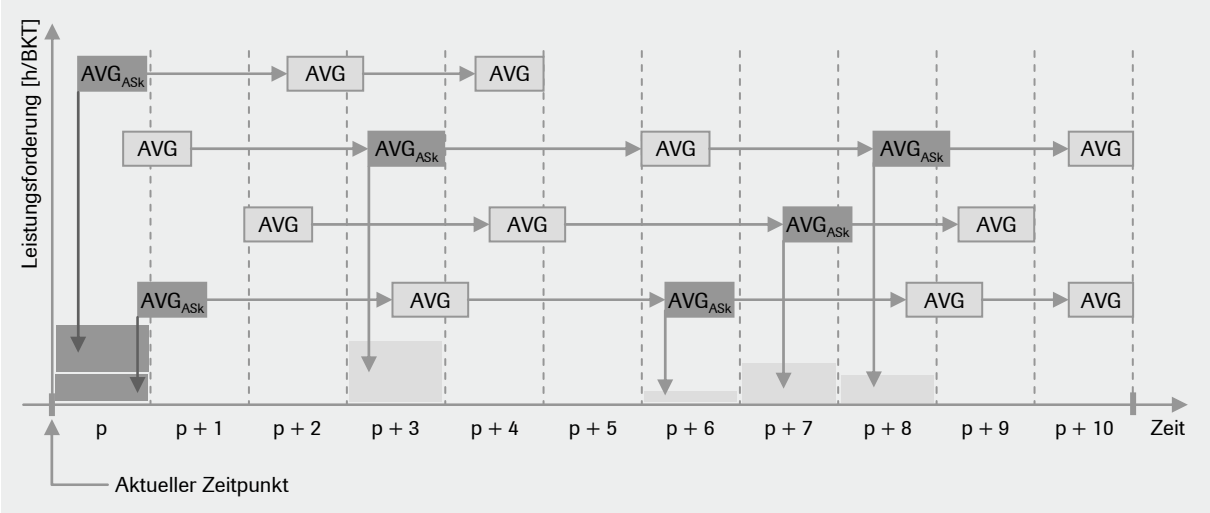


Abbildung 55: Ermittlung der Leistungsanforderung für ein Arbeitssystem k anhand der Summe der in der Folgeperiode anfallenden Auftragszeiten

Für die Berechnung der Leistungsanforderung für ein Arbeitssystem wird eine analoge Darstellung verwendet. Dies ist in Abbildung 55 beispielhaft für ein Arbeitssystem k dargestellt. Jene Arbeitsvorgänge der verschiedenen FA, die durch das Arbeitssystem k durchgeführt werden müssen, sind dunkelgrau hinterlegt. Die Unterschiede zur Berechnung der Prio-Quotienten lauten:

- Die Zeitachse wird in Perioden gegliedert
- Anstelle der dynamischen Durchlaufzeit (Sicht Fertigungsauftrag) interessiert die Summe der Auftragszeiten d_{ZAU}, die pro Periode und Arbeitssystem k anfallen (Sicht Arbeitssystem)

Als Periodenlänge wird die Dauer Tag gewählt. Mit dieser Festlegung ist es möglich, den anfallenden Arbeitsinhalt des AS (Summe der Auftragszeiten d_{ZAU} für das Arbeitssystem k) direkt mit der maximal möglichen Leistung des Arbeitssystems k zu vergleichen (siehe weiter unten, Ableitung des Steuerbestands für ein Arbeitssystem k anhand der Leistungsanforderung). Die Ermittlung der Leistungsanforderung wird demnach durch das Ereignis „Tageswechsel" angestossen. Der resultierende Wert hat Gültigkeit während der gesamten folgenden Periode (Tag). Aus diesem Grund wird ausschliesslich die unmittelbar folgende Periode p betrachtet und das Ergebnis für die weiter in der Zukunft liegenden Perioden ignoriert.

Die Leistungsanforderung für ein Arbeitssystem k für die unmittelbar folgenden Periode p berechnet sich also anhand der in Periode p anfallenden Auftragszeiten für das Arbeitssystem k:

$$L_{k\,p} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} d_{ZAU\,i\,j} \,\middle|\, t_{BS\,i\,j} \in d_l, l \le p \right\} \tag{4.7}$$

mit	k	Identifikationsnummer des AS [-]
	p	Zählnummer der unmittelbar folgenden Periode [-]
	l	Zählnummer einer beliebigen Periode [-]
	$L_{k\,p}$	Leistungsforderung des AS k in der Periode p [h / BKT]
	n	Anzahl der bekannten Fertigungsaufträge [-]
	m	Maximal mögliche Anzahl AVG [-]
	$d_{ZAU\,i\,j}$	Auftragszeit des j-ten AVG des i-ten FA [h]
	$t_{BS\,i\,j}$	Zeitpunkt Bearbeitungsstart des j-ten AVG des i-ten FA [BKT]
	d_l	Dauer der l-ten Periode [BKT]

Die sich ergebende Leistungsanforderung ist in der Einheit [h] angegeben, da die Periodenlänge 1 BKT beträgt. Die Auftragszeiten sämtlicher AVG, deren Startzeitpunkt t_{BS} (im Rahmen der Ermittlung der dynamischen Durchlaufzeit) in der Vergangenheit liegen, werden ebenfalls zur Leistungsforderung des AS für die Folgeperiode p gezählt. Somit sind aktuelle Arbeitsrückstände des AS mitberücksichtigt.

Ableitung des Steuerbestands für ein Arbeitssystem k anhand der Leistungsanforderung

Mit der in (4.7) berechneten Leistungsanforderung für das AS kann mit Kenntnis der Produktionskennlinie (siehe Abschnitt 2.5) der Steuerbestand B_{St} gemäss Abbildung 56 ermittelt werden.

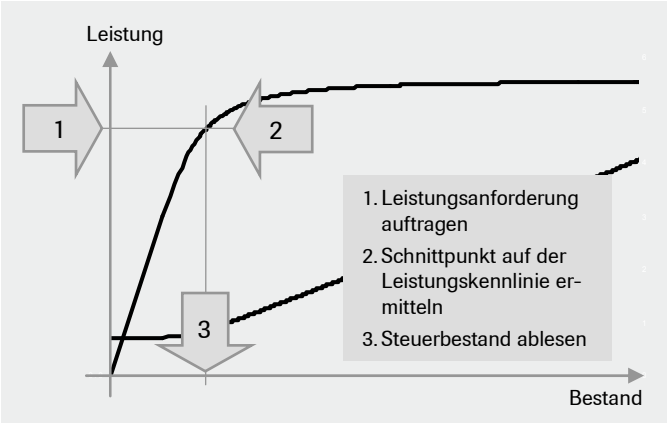


Abbildung 56: Ermittlung des Steuerbestands für ein Arbeitssystem anhand der Leistungsanforderung

Es gilt zu beachten, dass dazu die Produktionskennlinie verwendet wird, welche durch die zum betrachteten Arbeitssystem k gehörenden Werte aufgespannt wird. Es handelt sich jeweils um arbeitssystemspezifische Werte.

Das in Abbildung 56 qualitativ enthaltene Vorgehen versagt, falls die Leistungsanforderung grösser als die maximal mögliche Leistung des AS ist. Für Leistungsanforderungen knapp unterhalb der maximal möglichen Leistungen ist mit der Kenntnis über die Produktionskennlinie bekannt, dass die Elimination der letzten Prozente der mittleren Leistungsverluste mit hohen, mittleren Beständen „erkauft" werden muss (siehe Abschnitt 2.5). Damit steigt auch die mittlere Durchlaufzeit. Deshalb wird für die Bestimmung des Steuerbestands eine zusätzliche Grösse eingeführt:

- Der Limitierungsfaktor η des Steuerbestands ($0 < \eta \leq 1$; Defaultwert: 0.99)[-]

Unter Berücksichtigung des Limitierungsfaktors kann die mit (4.7) ermittelte Leistungsanforderung in (2.31) eingesetzt werden und nach der Laufvariablen s aufgelöst werden:

$$s_{k\,p} = \begin{cases} \left(1 - \sqrt[4]{1 - \dfrac{L_{k\,p}}{L_{\max\,k\,p}}}\right)^4 & , L_{k\,p} < \eta \cdot L_{\max\,k\,p} \\ \left(1 - \sqrt[4]{1 - \dfrac{\eta \cdot L_{\max\,k\,p}}{L_{\max\,k\,p}}}\right)^4 & , L_{k\,p} \geq \eta \cdot L_{\max\,k\,p} \end{cases} \tag{4.8}$$

mit s Laufvariable [-]

η Dimensionierungsfaktor der Leistung (Defaultwert: 0.99)[-]

Das Ergebnis (4.8) wird in (2.30) eingesetzt und es resultiert der Steuerbestand B_{St} des AS k:

$$B_{St\,k} = \overline{B}(s_{k\,p}) = \overline{B_{\min\,k}} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{s_{k\,p}})^4) + \overline{B_{\min\,k}} \cdot \alpha \cdot s_{k\,p} \tag{4.9}$$

Nach (4.8) gilt für Leistungsanforderungen grösser als die limitierte Maximalleistung (mit $\alpha = 10$):

$$s_{k\,p}(\eta = 0.99) = \left(1 - \sqrt[4]{1 - \frac{\eta \cdot L_{\max\,k\,p}}{L_{\max\,k\,p}}}\right)^4 = \left(1 - \sqrt[4]{1 - 0.01}\right)^4 \approx 0.2186 \tag{4.10}$$

$$B_{St\,k} = \overline{B}(s_{k\,p}) = \overline{B_{\min\,k}} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{0.2186})^4) + \overline{B_{\min\,k}} \cdot \alpha \cdot 0.2186 \approx 3.176 \cdot \overline{B_{\min\,k}} \tag{4.11}$$

Mit dem Limitierungsfaktor wird eine Obergrenze für die Leistungsanforderung des AS in Abhängigkeit der maximal möglichen Leistung gesetzt. Dadurch werden im Vergleich zur mittleren Leistung überproportional zunehmende mittlere Durchlaufzeiten verhindert. Bei Verwendung des angegebenen Defaultwerts resultiert nach (4.11) ein maximal möglicher Steuerbestand, der knapp das 3.2-fache des idealen Mindestbestands beträgt (mit Streckfaktor $\alpha = 10$).

4.4.4. Der Blockadebestand

Aus den Kenntnissen der Modellierung der logistischen Zielgrössen (siehe Abschnitt 2.4) sowie der Produktionskennlinie (siehe Abschnitt 2.5) ist bekannt, dass ab einem bestimmten mittleren Bestand die Leistungskennlinie eines Arbeitssystems stagniert (Sättigung) und die Reichweiten- resp. Durchlaufzeitenkennlinie weiter proportional ansteigt. Aus diesem Grund ist es naheliegend, neben dem in Abschnitt 4.4.3 erläuterten Steuerbestand einen *Blockadebestand des Arbeitssystems* (oder kurz *Blockadebestand*) zu führen. Der Einfluss des Blockadebestands auf den Ferti-

gungsablauf wird im Rahmen der Aufgabenumsetzung A1 bis A3 in Abschnitt 4.5 erläutert. An dieser Stelle reicht die Aussage, dass Bestandswerte grösser als der Blockadebestand zu verhindern sind, selbst wenn die Fertigungsauftragsdringlichkeiten dies erforderte.

Zur Festlegung des Blockadebestands wird eine zusätzliche Grösse eingeführt:

- Der Dimensionierungsfaktor ν des Blockadebestands ($\nu \in \Re$; Defaultwert: 5)[-]

Der Dimensionierungsfaktor des Blockadebestands legt fest, um das Wievielfache grösser der Blockadebestand des Arbeitssystems als der entsprechende mittlere, ideale Mindestbestand ist:

$$B_{Bl\ k} = \nu \cdot \overline{B_{\min\ k}} \tag{4.12}$$

Mit dem Defaultwert 5 betragen die mittleren Auslastungsverluste weniger als 0.2 % in Bezug auf die maximal mögliche Leistung ($\alpha = 10$). Dies lässt sich mit (2.30) und (2.31) nachweisen.

Es muss stets gelten:

$$B_{Bl\ k} > B_{St\ k} \tag{4.13}$$

Die Erfüllung der Forderung (4.13) wird über die Parametrierung des Limitierungsfaktors η des Steuerbestands und des Dimensionierungsfaktors ν des Blockadebestands erreicht. Bei Verwendung der aufgeführten Defaultwerten ist die Forderung (4.13) erfüllt.

Bezeichnet man als *Auftragslast* die Summe der Auftragszeiten, welche sich in der Fertigungsauftragsliste pro Periode und Arbeitssystem befindet, so hat der Blockadebestand im Unterschied zum Steuerbestand keinen Bezug zur Auftragslast. Definieren der Mittelwert und die Standardabweichung der Auftragszeiten pro Arbeitssystem die *Auftragsstruktur*, so ist diese im mittleren, idealen Mindestbestand des Arbeitssystems berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.5.2). Sowohl der Steuer- als auch der Blockadebestand hängen gemäss (4.11) und (4.13) vom idealen Mindestbestand und somit also auch gleichermassen von der Auftragsstruktur des Fertigungssystems ab.

4.4.5. Zustände eines Arbeitssystems

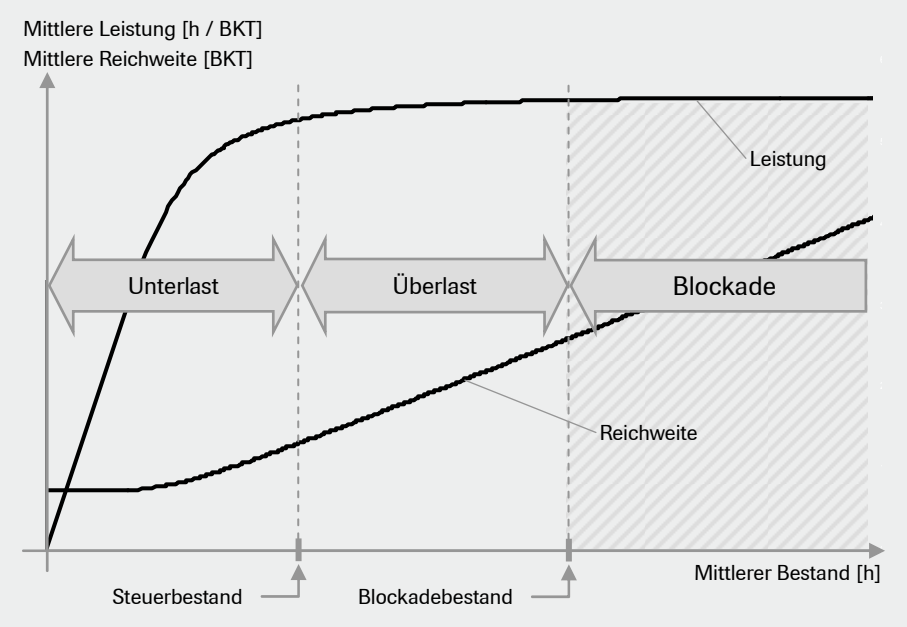


Abbildung 57: Mögliche Zustände eines Arbeitssystems, welche durch den Steuer- und den Blockadebestand abgegrenzt werden

Wenn man den zu einem Arbeitssystem gehörenden Steuer- und Blockadebestand (siehe Abschnitt 4.4.3 und 4.4.4) in der zum Arbeitssystem gehörenden Produktionskennlinie aufträgt, ergeben sich drei mögliche Bereiche. Diese Bereiche sind in Abbildung 57 mit den entsprechenden Bereichsgrenzen dargestellt. Die Bereichszugehörigkeit des Istbestands eines Arbeitssystems definiert den Zustand des Arbeitssystems. Der aktuelle Zustand eines Arbeitssystems ist jederzeit eindeutig feststellbar. In Abhängigkeit der verschiedenen Zustände können unterschiedliche Verhaltensweisen des Arbeitssystems hinsichtlich der zu erfüllenden Aufgaben A1 bis A3 (siehe Abschnitt 4.3.2) festgelegt werden. Es resultiert eine zustandsbedingte Verhaltensweise.

Im Folgenden werden die drei möglichen Zustände eines Arbeitssystems aus Abbildung 57 vorgestellt. Zur Erläuterung gehört auch eine kurze, qualitative Beschreibung der unterschiedlichen Verhaltensweise der Arbeitssysteme. Die konkrete Umsetzung der Aufgabenbearbeitung, und somit auch die Verhaltensweise, wird im Abschnitt 4.5 detailliert beschrieben.

Der Zustand Unterlast

Das Arbeitssystem befindet sich im Zustand Unterlast, falls sich der Istbestand zwischen Null und dem Steuerbestand bewegt. Hinsichtlich der Freigabe von Fertigungsaufträgen (sofern das Arbeitssystem als erstes in den Operationsplänen aufgeführt ist) verhält sich das Arbeitssystem „freizügig“. Das setzt voraus, dass die zu den Fertigungsaufträgen gehörenden Prio-Quotienten einen entsprechenden Schwellwert unterschritten haben. Durch diese „Freizügigkeit“ steigt der Istbestand des Arbeitssystems und nähert sich dem Steuerbestand. Die Bearbeitung von Arbeitsvorgängen senkt den Istbestand und vergrössert die Differenz zum Steuerbestand. Deshalb arbeitet das Arbeitssystem die Warteschlange nur in dem Fall ab, in welchem allfällige Dringlichkeiten in Form des Prio-Quotienten angezeigt sind und der Zustand des entsprechenden Nachfolgers dies zulässt. Dadurch soll die Differenz zwischen Ist- und Steuerbestand minimiert werden.

➔ das Arbeitssystem arbeitet nur in dringenden Fällen, es verhält sich *kostenoptimal*

Der Überlastbereich

Das Arbeitssystem befindet sich im Zustand Überlast, falls der Istbestand zwischen Steuerbestand und Blockadebestand liegt. Der aktuelle Bestand des Arbeitssystems ist grösser als der für diese Periode vorgegebene mittlere Bestand (Steuerbestand). Deshalb verhält sich das Arbeitssystem betreffend der Freigabe von Fertigungsaufträgen (sofern das Arbeitssystem als erstes in den Operationsplänen aufgeführt ist) „passiv“. Fertigungsaufträge in der Auftragsliste werden nur in dem Fall durch das Arbeitssystem freigegeben, in welchem der zum Fertigungsauftrag gehörende Prio-Quotient die entsprechende Dringlichkeit ausweist. Damit soll eine weitere Zunahme des Istbestands auf nicht vermeidbare Fälle reduziert werden. Das Arbeitssystem arbeitet die Warteschlange nach Dringlichkeit der Fertigungsaufträge (Prio-Quotienten) und unter Berücksichtigung der jeweiligen Nachfolgerzustände ab. Die Absicht besteht darin, den Istbestand möglichst zu reduzieren und nahe an den Steuerbestand zu gelangen.

➔ das Arbeitssystem arbeitet wenn möglich, es verhält sich *durchlaufoptimal*

Der Blockadebereich

Das Arbeitssystem befindet sich im Zustand Blockade, falls der Istbestand grösser als der Blockadebestand ist. Der Zustand Blockade ist ein zu vermeidender Zustand (aus Abschnitt 2.5 über die Produktionskennlinie ist bekannt, dass in diesem Zustand durch zusätzliche Fertigungsaufträge keine Erhöhung der Leistung realisiert werden kann und lediglich die Durchlaufzeit verschlechtert wird). Deshalb soll das Arbeitssystem im Zustand Blockade keine zusätzlichen Fertigungsaufträge

freigeben. Selbst dann nicht, wenn diese dringend sind (Prio-Quotient). Das Arbeitssystem „muss“ arbeiten um den Istbestand zu reduzieren. Die Dringlichkeit der Fertigungsaufträge (Prio-Quotient) wird dabei nicht als Entscheidungskriterium, sondern lediglich als Sortierkriterium der Warteschlange verwendet. Die Arbeitsaktivität des Arbeitssystems kann nur dadurch verhindert werden, falls sich sämtliche Nachfolgerarbeitssysteme selber im Zustand Blockade befinden. Die Nachfolgerarbeitssysteme sind durch die Operationspläne der sich in der Warteschlange befindlichen Fertigungsaufträge definiert. Es existieren keine vordefinierten Abläufe.

➔ das Arbeitssystem arbeitet praktisch immer, es verhält sich *durchsatzoptimal*

4.5. Umsetzung der Aufgabenbearbeitung

Im Abschnitt 4.4 sind Schlüsselelemente des Verfahrens vorgestellt worden. In diesem Abschnitt wird erklärt, wie diese Schlüsselelemente eingesetzt werden um die in Abschnitt 4.3.2 aufgeführten Aufgaben A1 bis A3 der Arbeitssysteme zu erledigen. Der Ablauf gliedert sich in Steuerung und Regelung und benötigt die Schlüsselemente als Hilfs- und Informationsmittel.

4.5.1. Steuerung, Regelung und Hilfsmittel

Die Steuerung

Unter Steuerung wird der offene Wirkungsablauf verstanden (siehe Abschnitt 3.1), welcher pro Arbeitssystem den Steuerbestand (siehe Abschnitt 4.4.3) festlegt. Dazu wird die Auftragslast, im Sinne der Summe der Auftragszeiten pro Arbeitssystem und Periode, berücksichtigt. Der Steuerbestand entspricht dem gewollten Arbeitspunkt resp. der Führungsgrösse pro Arbeitssystem. Er wird periodisch (täglich) aktualisiert und die entsprechende Berechnung durch das Ereignis *Kalendertageswechsel* angestossen. Somit werden Mutationen in der Fertigungsauftragsliste in regelmässigen Abständen in die Berechnung miteinbezogen (z.B. neue Fertigungsaufträge, aktualisierte Sollendtermine, etc.).

Die Regelung

Mit Regelung wird das Halten des vorgegebenen Arbeitspunktes pro Arbeitssystem verstanden. Die Regelgrösse ist dabei der Istbestand des Arbeitssystems. Die Handlungsalternativen sind durch die Aufgaben A1 bis A3 der dezentralen Stellen (siehe Abschnitt 4.3.2) gegeben. Durch die Freigabe von Fertigungsaufträgen wird der Istbestand erhöht, durch Bearbeitung von Fertigungsaufträgen wird er reduziert. Dieser Entscheidungsspielraum wird durch die Dringlichkeit der Fertigungsaufträge sowie die Zustände der entsprechenden Nachfolgerarbeitssysteme beeinflusst. Diese Informationen werden zentral (in der Fertigungsauftragsliste) geführt und sofort berücksichtigt. Der Regelentscheid erfolgt dezentral und wird durch das Ereignis *Bearbeitungsende eines AVG* angestossen (siehe Abschnitt 4.3.3).

Die Hilfsmittel

Als Hilfs- resp. Informationsmittel für die Umsetzung der Aufgaben A1 bis A3 werden die folgenden Schlüsselelemente eingesetzt:

- Der Prio-Quotient des Fertigunggsauftrags (siehe Abschnitt 4.4.1)
- Der Auftragsschlupf des Fertigungsauftrags (siehe Abschnitt 4.4.2)
- Die Zustände der Arbeitssysteme, welche mit Hilfe der Steuer- und Blockadebestände der Arbeitssysteme festgelegt werden (siehe Abschnitt 4.4.5 bis 4.4.5)

4.5.2. Allgemeine Synchronisation der Aufgabenbearbeitung

Im Zusammenhang mit der Aufgabensynchronisation gilt es die Steuerungsaufgabe und die Regelungsaufgaben zu unterscheiden (siehe Abbildung 58). Die Steuerungsaufgabe beinhaltet die Berechnung des Steuerbestands pro Arbeitssystem (Ermittlung der Führungsgrösse). Die Durchführung dieser Aufgabe wird durch das Ereignis *Kalendertageswechsel* angestossen. Die Regelungsaufgaben setzen sich aus den Aufgaben A1 bis A3 der dezentralen Stellen zusammen (siehe Abschnitt 4.3.2). Die Durchführung der Regelungsaufgaben wird durch das Ereignis *Bearbeitungsende eines AVG* ausgelöst. Das Ergebnis der Steuerungsaufgabe kann Einfluss auf die Regelungsaufgaben haben (z.B. kann sich durch den aktualisierten Steuerbestand der Zustand eines Arbeitssystems ändern) und gilt aus diesem Grund ebenfalls als ein Ereignis, das die Durchführung der Regelungsaufgaben anstösst. Im eigentlichen Sinne ist es also das Ereignis *Kalendertageswechsel*, welches zusätzlich die Durchführung der Regelungsaufgaben auslöst. Die Synchronisation der Aufgabenreihenfolge (Steuerungsaufgabe vor Regelungsaufgaben) ist allerdings erforderlich und in Abbildung 58 dargestellt. Pro Ereignis sind sowohl die Steuerungs- als auch die Regelungsaufgaben für alle Arbeitssysteme des Fertigungssystems durchzuführen.

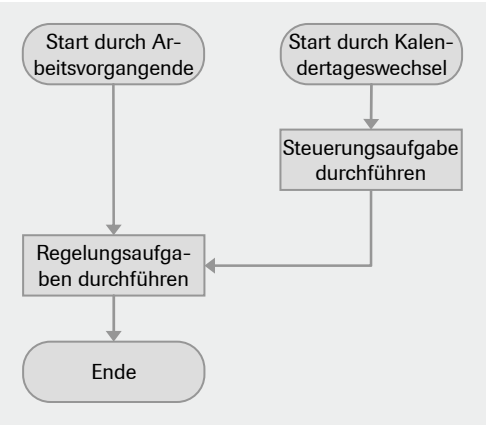


Abbildung 58: Synchronisation der Steuerungs- und Regelungsaufgaben

Im Unterschied zur Steuerungsaufgabe handelt es sich bei den Regelungsaufgaben A1 bis A3 um mehrere Aufgaben. Entsprechend gilt es auch die Reihenfolge innerhalb der Regelungsaufgaben zu synchronisieren. Die Aufgaben A2 (Prüfe, ob gearbeitet werden soll) und A3 (Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge) sind nicht unabhängig. Deshalb wird vorerst nur zwischen den Aufgabengruppen „Auftragsfreigabe“ (A1) und „Auftragsbearbeitung“ (A2 + A3) unterschieden. Somit verbleiben die beiden Reihenfolgemöglichkeiten „Auftragsfreigabe“ vor „Auftragsbearbeitung“ oder „Auftragsbearbeitung“ vor „Auftragsfreigabe“.

Ebenfalls gilt es festzulegen, ob der Ablauf der Regelungsaufgaben seriell oder parallel erfolgen soll. Beim seriellen Ablauf wird eine Regelungsaufgabe für jeweils alle Arbeitssysteme durchgeführt bevor die Bearbeitung der nächsten Regelungsaufgabe begonnen wird. Beim parallelen Ablauf werden alle Regelungsaufgaben pro Arbeitssystem bearbeitet, bevor das nächste Arbeitssystem betrachtet wird. Der Steuerungsblock und der Regelungsblock müssen gemäss Abbildung 58 seriell geschaltet sein, da sie unterschiedliche Durchführungsfrequenzen aufweisen. Dazu kommt, dass das Ergebnis der Steuerungsaufgabe unabhängig vom Ergebnis der Regelungsaufgaben ist.

Aus den beiden Möglichkeiten der Reihenfolge innerhalb der Regelungsaufgaben sowie aus den beiden Ablaufarten der Regelungsaufgaben ergeben sich hinsichtlich der Aufgabensynchronisation vier Varianten. Diese Varianten sind in Abbildung 59 dargestellt. Jede Variante in Abbildung 59 umfasst neben dem Regelungsblock auch den Steuerungsblock. Dieser ist den aufgeführten

Gründen zufolge dem Regelungsblock seriell vorgeschaltet. Der in Abbildung 59 enthaltene Umfang pro Variante entspricht jenem der Regelungs- und Steuerungsaufgabe aus Abbildung 58. Die Detaillierung der inhaltlichen Darstellung unterscheidet sich in den beiden Abbildungen.

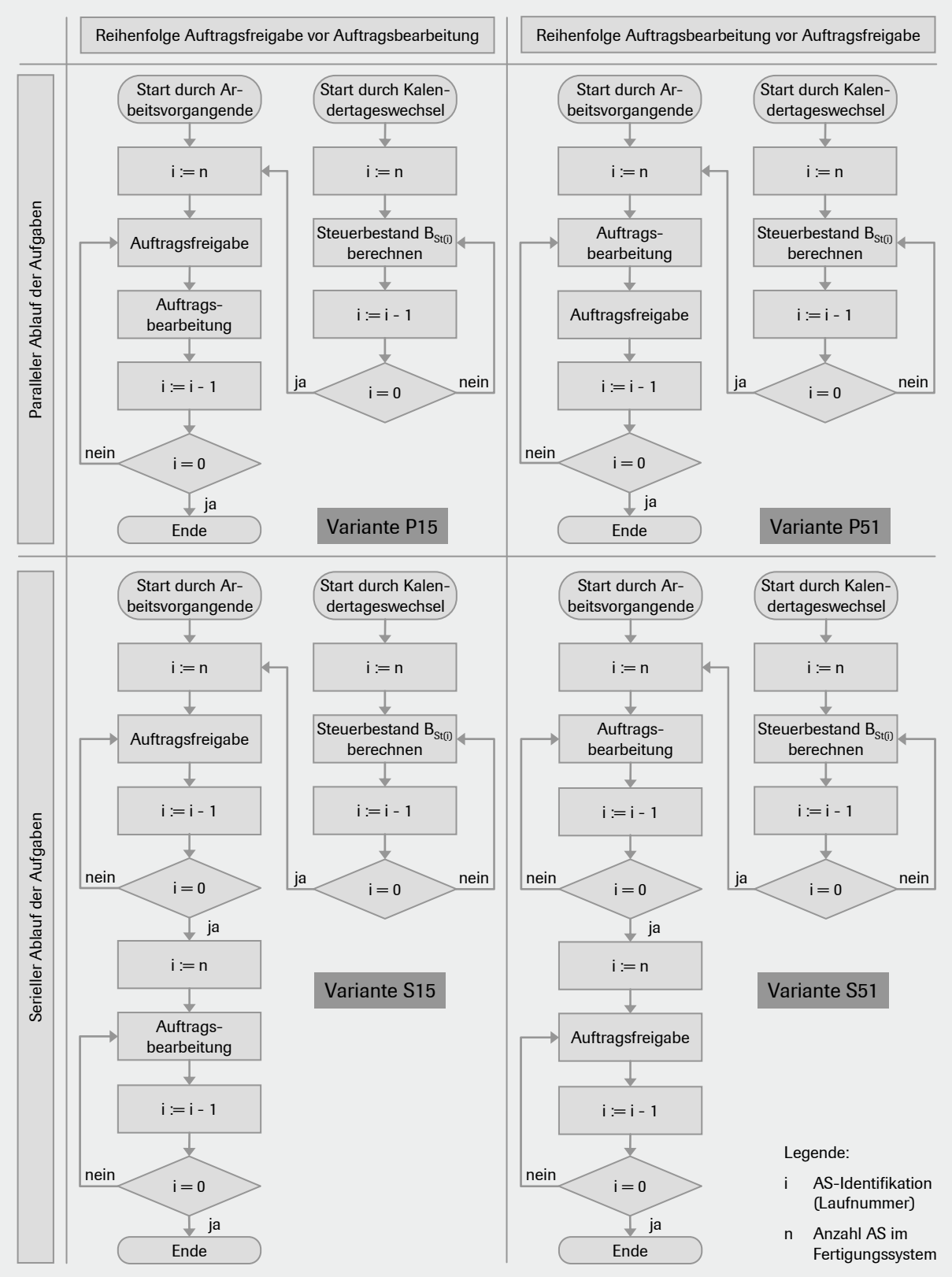


Abbildung 59: Die möglichen vier Varianten der Aufgabensynchronisation aufgrund eines parallelen (P) oder seriellen (S) Ablaufs und der Aufgabenreihenfolge „Auftragsfreigabe“ vor „Auftragsbearbeitung“ (15) oder „Auftragsbearbeitung“ vor „Auftragsfreigabe“ (51) – die 1 steht für die Folgenummer A1, die 5 steht für die Quersumme der Folgenummer A2 und A3

Für den in diesem Abschnitt vorgestellten Entwurf einer Steuerungs- und Regelungsstrategie wird die *Variante P15* verwendet. Diese Festlegung erfolgt aufgrund folgender Überlegungen:

Reihenfolge X15

Aus Sichtweise Aufgabenreihenfolge ist es sinnvoll, erst die Fertigungsaufträge für ein Arbeitssystem freizugeben und anschliessend die Entscheidung zu fällen, ob gearbeitet werden soll. Dadurch ist die Auswahlmenge der zu bearbeitenden Fertigungsaufträge für das Arbeitssystem grösser. Zusätzlich werden nach dieser Reihenfolgevariante allfällige Eilaufträge innert kürzerer Zeit für die Bearbeitung berücksichtigt.

Ablauf PXX

Durch die festgelegte Aufgabenreihenfolge wird sich die Auswahl an zu bearbeitenden Fertigungsaufträgen nicht ändern, unabhängig davon, ob die Ablaufart seriell oder parallel abläuft. Die parallele Ablaufart hat aus Sicht Rechenaufwand den Vorteil, dass sie effizienter ist (die Arbeitssysteme i werden lediglich einmal „aufgerufen"). Aus diesem Grund wird die parallele Ablaufvariante der seriellen vorgezogen.

Grundsätzlich sind alle vier Synchronisationsvarianten in Abbildung 59 funktionsfähig. Die Einflussstärke der Synchronisationsvarianten auf die Zielgrössenwerte kann durch den Einsatz des Entwurfs in der Realität (Kosten!) ermittelt oder durch Simulation angenähert werden. Der in diesem Abschnitt vorgestellte Entwurf einer Fertigungssteuerung und –regelung wird im Abschnitt 5 mit Verwendung von Simulationssoftware umgesetzt. Diese Umsetzung erfolgt anhand der Variante P15. Auf einen Vergleich mit den anderen Varianten wird verzichtet, da die Variantenwahl an dieser Stelle qualitativ begründet wird und das Thema der Aufgabensynchronisation nicht den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellt.

4.5.3. Der Einsatz von Entscheidungstabellen

Die in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Aufgaben A1 bis A3, welche durch die dezentralen Stellen (Arbeitssysteme) durchzuführen sind, erfolgen mittels diskreter Regelung (siehe Abschnitt 4.5.1). Die dazu notwendigen Hilfs- resp. Informationsmittel wie Prio-Quotient, Auftragsschlupf und Zustand der Arbeitssysteme wurden erläutert (siehe Abschnitt 4.4). In den folgenden Abschnitten 4.5.4 und 4.5.5 wird die detaillierte Entscheidungsfindung der Aufgaben pro Aufgabengruppe vorgestellt.

ET		Bedingungskombinationen							
Bedingungen	B1	j	j	j	n	j	n	n	n
	B2	j	j	n	j	n	j	n	n
	B3	j	n	j	j	n	n	j	n
Aktionen	A1			x	x		x		x
	A2	x		x				x	
	A3		x			x			x

Abbildung 60: Struktur der verwendeten Entscheidungstabellen

Dazu werden Entscheidungstabellen (ET) verwendet. Entscheidungstabellen eignen sich, um komplexe Abhängigkeiten zwischen mehreren Bedingungen und den jeweils auszuführenden Ak-

tionen übersichtlich und vollständig darzustellen. Die verwendeten Entscheidungstabellen bestehen aus vier Teilbereichen (siehe Abbildung 60):

- Auflistung der zu berücksichtigenden Bedingungen (links oben)
- Auflistung der möglichen Aktionen (links unten)
- Bereich, in dem die möglichen Bedingungskombinationen zusammengestellt sind (rechts oben)
- Bereich, in dem jeder Bedingungskombination die jeweils durchzuführenden Aktionen zugeordnet sind (rechts unten)

Die Anzahl Bedingungskombinationen ergibt sich aus der Anzahl Bedingungen (n) und beträgt jeweils 2^n. Eine Regel setzt sich aus einer bestimmten Bedingungskombination und den dazugehörenden Aktionen zusammen. Somit entspricht in der rechten Bildhälfte der Abbildung 60 jede Spalte einer Regel.

4.5.4. Die Aufgabengruppe Auftragsfreigabe

Die Aufgabengruppe „Auftragsfreigabe“ umfasst die Aufgabe A1 „Prüfe, ob ein Fertigungsauftrag ab Fertigungsauftragsliste freigegeben werden soll“ (siehe Abschnitt 4.5.2). Diese Aufgabenumsetzung wird durch Verwendung einer Entscheidungstabelle der Form gemäss Abschnitt 4.5.3 realisiert. Der Entscheid eines Arbeitssystems hinsichtlich der Auftragsfreigabe ab Fertigungsauftragsliste hängt von folgenden Bedingungen ab:

- Zustand des Arbeitssystems (Bedingungen B1 bis B3)
- Prio-Quotient des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingungen B6 und B7)

Um die Entscheidungsfindung differenziert durchführen zu können soll ebenfalls berücksichtigt werden können, ob die Warteschlange des AS zum Betrachtungszeitpunkt leer ist. Davon hängt ab, ob das AS über mindestens einen Freiheitsgrad hinsichtlich der Aufgabengruppe „Auftragsbearbeitung“ verfügt (verfügen wird) und entsprechend kann der Entscheid betreffend der „Auftragsfreigabe“ anders ausfallen. Bei dieser Überlegung ist es sinnvoll auch die Führungsgrösse des AS in Betracht zu ziehen, also den Steuerbestand. Aus diesem Grund beinhaltet die Entscheidungstabelle ebenfalls folgende zwei Bedingungen:

- Arbeitsvorrat gleich 0 (Bedingung B4)
- Steuerbestand gleich 0 (Bedingung B5)

Sie sind in der Entscheidungstabelle „ET Auftragsfreigabe“ zusammengefasst. Diese ist in der Abbildung 61 dargestellt. Die insgesamt sieben Bedingungen ergeben theoretisch 128 ($=2^7$) mögliche Kombinationen. Um die Entscheidungstabelle in Abbildung 61 übersichtlich zu halten sind unsinnige Bedingungskombinationen, die den Zustand des Arbeitssystems beschreiben, a priori weggelassen. Die Bedingungen B1 bis B3 sind voneinander abhängig, da von diesen drei Bedingungen genau eine die Ja-Ausprägung ausweisen muss. Alle anderen Kombinationsmöglichkeiten von B1, B2 und B3 führen zu Fehlermeldungen, da sie unrealistische Situationen wiedergeben. Dadurch reduziert sich die Anzahl Bedingungskombinationen auf $3 * 2^{(7-3)} = 3 * 2^4 = 48$ Stück.

Die Abbildung des Prio-Quotienten in Form von Ja/Nein-Ausprägungen erfordert zwei Bedingungen (B6 und B7), da sich dieser in drei entscheidungsrelevanten Wertebereichen befinden kann (siehe Abschnitt 4.4.1). Er ist entweder negativ, positiv und kleiner als der Wert 1 oder grösser als der Wert 1. Anstelle des Werts 1 wird ein parametrierbarer Schwellwert $SW_{FA-Freigabe}$ mit dem Defaultwert 1 verwendet. Die Parametrierbarkeit des Schwellwerts ermöglicht es, im Rahmen der Steuerungs- und Regelungsstrategie konservative resp. liberale Verhaltensweisen vorzugeben.

a) Entscheidungstabelle „Auftragsfreigabe“ (Regel 1 – 24)

	ET Auftragsfreigabe (Regel 1 – 24)	Bedingungskombinationen																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
B1	AS = Unterlast	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n
B2	AS = Überlast	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n
B3	AS = Blockade	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j
B4	Arbeitsvorrat = 0	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n
B5	Steuerbestand = 0	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n
B6	$0 < PQ < SW_{FA\text{-}Freigabe}$	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
B7	PQ <= 0	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
A1	FA freigeben	x				x		x			x	x		x				x		x			x	x	
A2	FA nicht freigeben						x						x						x						x
A3	Error (B1, B4 und B5)				x												x								
A4	Error (B2, B4 und B5)		x						x						x						x				
A5	Error (B3, B4 und B5)			x						x						x						x			
A6	Error (B6 und B7)																								

b) Entscheidungstabelle „Auftragsfreigabe“ (Regel 25 – 48)

	ET Auftragsfreigabe (Regel 25 – 48)	Bedingungskombinationen																							
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
B1	AS = Unterlast	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n
B2	AS = Überlast	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n
B3	AS = Blockade	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j
B4	Arbeitsvorrat = 0	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n
B5	Steuerbestand = 0	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n
B6	$0 < PQ < SW_{FA\text{-}Freigabe}$	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
B7	PQ <= 0	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
A1	FA freigeben							x																	
A2	FA nicht freigeben	x				x	x				x	x	x												
A3	Error (B1, B4 und B5)				x												x								
A4	Error (B2, B4 und B5)		x						x						x							x			
A5	Error (B3, B4 und B5)			x						x						x							x		
A6	Error (B6 und B7)													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Abbildung 61: Entscheidungstabelle „Auftragsfreigabe“ mit Regel 1 – 24 (oben) und Regel 25 – 48 (unten) wobei Bedingungskombinationen ohne eindeutigen AS-Zustand nicht berücksichtigt sind

Die mit der Entscheidungstabelle zu bestimmenden Aktionen lauten entweder „FA freigeben“ (A1) oder „FA nicht freigeben“ (A2). Bei den weiteren Aktionen A3 bis A6, die in Abbildung 61 aufgeführt sind, handelt es sich um Fehlermeldungen, die auf unmögliche Bedingungskombinationen (zusätzlich zu der Eindeutigkeit des Zustands des Arbeitssystems) hinweisen. So kann beispielsweise der Zustand eines Arbeitssystems nicht „Unterlast“ lauten, wenn gleichzeitig der Steuerbestand 0 beträgt und der Istbestand grösser 0 ist (Regel 4, 16, 28 und 40 in Abbildung 61). Die Fehlermeldungen sind zum besseren Verständnis in A3 bis A6 gruppiert und mit den Bedingungsnummern versehen, die den Fehler verursachen. Die für die Fehlermeldung entscheidenden Ausprägungen sind dunkelgrau hinterlegt. Mehrfachfehler pro Bedingungskombination sind möglich.

4.5.5. Die Aufgabengruppe Auftragsbearbeitung

Die Aufgabengruppe „Auftragsbearbeitung“ besteht aus den Aufgaben A2 „Prüfe, ob gearbeitet werden soll“ und A3 „Wahl des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags“ (siehe Abschnitt 4.5.2).

Die Realisierung der Aufgabe A2 erfolgt ebenfalls durch den Einsatz des Hilfsmittels Entscheidungstabelle. Die Entscheidung der Aufgabe A2 „Prüfe, ob gearbeitet werden soll“ hängt nicht ausschliesslich vom Zustand des Arbeitssystems und den Prio-Quotienten der Fertigungsaufträge in der Warteschlange ab. Es wird zusätzlich der Zustand des nachfolgenden Arbeitssystems in die Betrachtung mit einbezogen. Falls es sich um den letzten Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags handelt ist dies nicht möglich und es werden zum Teil andere Bedingungen verwendet. Aus diesem Grund sind für die Aufgabe A2 zwei unterschiedliche Entscheidungstabellen notwendig. Die Wahl der zu verwendenden Entscheidungstabelle hängt davon ab, ob es sich beim betrachteten Fertigungsauftrag um den letzten Arbeitsvorgang handelt oder nicht.

Die Realisierung der Aufgabe A3 „Wahl des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags“ wird nicht durch Verwendung einer Entscheidungstabelle gelöst. Die Aufgabenbearbeitung erfolgt durch das Sortieren einer Liste, welche die zur Bearbeitung möglichen Fertigungsaufträge enthält. Das sind alle Fertigungsaufträge, die sich in der Warteschlange des Arbeitssystems befinden.

Wie bereits erwähnt wird bei der Aufgabe A2 der Zustand des nachfolgenden Arbeitssystems berücksichtigt (sofern es sich nicht um den letzten Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags handelt). Das kann für jeden Fertigungsauftrag der Warteschlange ein anderes Arbeitssystem sein. Je nach Nachfolgerkonstellation kann resultieren, dass der *nicht dringlichste Fertigungsauftrag* bearbeitet wird. Das setzt voraus, dass die Fertigungsaufträge in der Wartesschlange zuerst in eine aktuelle Bearbeitungsreihenfolge gebracht werden (Aufgabe A3). Anschliessend wird ein Fertigungsauftrag nach dem andern geprüft, ob er bearbeitet werden soll (Aufgabe A2). Die Reihenfolge innerhalb der Aufgabengruppe „Auftragsbearbeitung“ lautet demnach A3 vor A2.

Aufgabe A3 „Wahl des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags“

Die zur Wahl stehenden Fertigungsaufträge befinden sich im Bestand (Warteschlange) des Arbeitssystems. Diese Auswahl gilt es der Dringlichkeit nach zu sortieren. Die Sortierung der Warteschlange erfolgt, in absteigender Priorität, anhand der folgenden Kriterien:

1.) Prio-Quotient < 0 vor Prio-Quotient $>= 0$

2.) Auftragsschlupf $>= 0$ vor Auftragsschlupf < 0

3.) Aufsteigender Prio-Quotient

Es resultiert eine Reihenfolge der Fertigungsaufträge aus der Warteschlange, in welcher jene Fertigungsaufträge zuoberst stehen, die den Endtermin bereits überschritten haben (rückständige Fertigungsaufträge). Diese haben definitionsbedingt sowohl einen negativen Prio-Quotienten als auch einen negativen Auftragsschlupf (1. Sortierkriterium). Anschliessend folgen die Fertigungsaufträge, die technisch (aufgrund der Auftragszeit) noch realisierbar sind (Auftragsschlupf ist grösser/gleich Null). Das erfolgt anhand des zweiten Sortierkriteriums. Die dritte Kategorie beinhaltet die verbleibenden Fertigungsaufträge. Pro Kategorie werden die Fertigungsaufträge der Dringlichkeit nach, anhand des Prio-Quotienten, sortiert.

Aufgabe A2 „Prüfe, ob gearbeitet werden soll“

Die Prüfung erfolgt pro Fertigungsauftrag der entsprechenden Warteschlange. Die Reihenfolge der Fertigungsaufträge wurde durch die Aufgabe A3 festgelegt und es wird mit dem ersten

(dringlichsten) Fertigungsauftrag begonnen. Ergibt die Prüfung eines Fertigungsauftrags ein positives Ergebnis wird die Prüfung der verbleibenden Fertigungsaufträge der Warteschlange ausgelassen. In Abhängigkeit davon, ob es sich um den letzten Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags handelt oder nicht, wird eine Entscheidungstabelle mit teilweise unterschiedlichen Bedingungen verwendet.

Handelt es sich beim betrachteten Fertigungsauftrag um den letzten Arbeitsvorgang, so sind folgende Bedingungen zur Entscheidung notwendig:

- Zustand des Arbeitssystems (Bedingungen B1 bis B3)
- Prio-Quotient des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingungen B4 und B5)
- Endtermin des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingung B6)
- Transportzustand des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingung B7)

Die insgesamt sieben Bedingungen der resultierenden Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“ ergeben theoretisch 128 (=2^7) mögliche Kombinationen. Um die Entscheidungstabelle (sieheAbbildung 62) übersichtlich zu halten sind wiederum die unmöglichen Kombinationen aus B1, B2 und B3 a priori weggelassen (Abhängigkeit der Bedingungen). Auch die Bedingungskombinationen, welche in der Bedingung B7 die Ausprägung „ja“ ausweisen, sind in der Abbildung 62 nicht dargestellt. Diese Fertigungsaufträge werden zum aktuellen Zeitpunkt zur Warteschlange des betrachteten Arbeitssystems transportiert. Das ergibt sich aus der Definition in Abschnitt 2.2.2, nach welcher der FA ab Rückmeldung des Vorgängerarbeitssystems zum Bestand zählt. Es ergeben sich somit $3 * 1 * 2^{(7-3-1)} = 3 * 1 * 2^3 = 24$ Kombinationsmöglichkeiten (Regeln).

ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)		Bedingungskombinationen																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
B1	AS = Unterlast	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n
B2	AS = Überlast	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n
B3	AS = Blockade	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j
B4	$0 < PQ < SW_{Bearbeitung}$	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
B5	PQ <= 0	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n
B6	$FA_{Endtermin} <= BKT + \Delta_{TT}$	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n	j	j	j	n	n	n
B7	FA wird transportiert	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
A1	FA bearbeiten							x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x		x	x
A2	FA nicht bearbeiten																						x		
A3	Error (B4 und B5)	x	x	x	x	x	x																		
A4	Error (B5 und B6)				x	x	x										x	x	x						

Abbildung 62: Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“ wobei die Bedingungskombinationen, in welchen sich der FA im Transportstatus befindet, nicht berücksichtigt sind

Betreffend der Bedingungen B4 und B5 in Abbildung 62 über den Prio-Quotienten gelten dieselben Bemerkungen wie bei der Entscheidungstabelle „ET Auftragsfreigabe“ in Abschnitt 4.5.4. Es wird ein vom Schwellwert für die Auftragsfreigabe unabhängiger Schwellwert $SW_{Bearbeitung}$ mit dem Defaultwert 1 [-] verwendet. Somit ist die Parametrierung des Schwellwerts für die Auftragsbearbeitung $SW_{Bearbeitung}$ unabhängig vom Schwellwert für die Auftragsfreigabe $SW_{FA-Freigabe}$. Die Bedingung 6 berücksichtigt den Sollendtermin des Fertigungsauftrags. Sie verhindert, dass Fertigungsaufträge (deutlich) zu früh fertig gestellt werden. In Abhängigkeit davon, ob der Sollendtermin des FA in eine akzeptierte Termintoleranz Δ_{TT} zur Ermittlung der Termintreue fällt (Bedin-

gung 6), kann der Entscheid zur Bearbeitung (Aktion) unterschiedlich ausfallen. Diese Termintoleranz wird ab dem aktuellen Betriebskalendertag (BKT) aus betrachtet.

Die mit der Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“ zu bestimmenden Aktionen lauten entweder „FA bearbeiten“ oder „FA nicht bearbeiten“. Bei den weiteren Aktionen, die in Abbildung 62 aufgeführt sind, handelt es sich um Fehlermeldungen, die auf unmögliche Bedingungskombinationen (zusätzlich zu der Eindeutigkeit des Zustands des Arbeitssystems) hinweisen. Beispielsweise kann der Sollendtermin eines FA nicht weiter in der Zukunft liegen als der um die akzeptierte Termintoleranz Δ_{TT} in die Zukunft verschobene aktuelle Betriebskalendertag und gleichzeitig einen negativen Prio-Quotienten ausweisen (Regel 4, 5, 6, 16, 17 und 18).

a) Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ (Regel 1 – 18)

ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG, R1-18)		Bedingungskombinationen																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
B1	AS = Unterlast	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n
B2	AS = Überlast	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n
B3	AS = Blockade	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j
B4	NF = Unterlast	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n
B5	NF = Überlast	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n
B6	NF = Blockade	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j
B7	$0 < PQ < SW_{Bearbeitung}$	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
B8	PQ <= 0	j	j	j	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n
B9	FA wird transportiert	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
A1	FA bearbeiten										x	x	x	x	x	x			
A2	FA nicht bearbeiten																x	x	x
A3	Error (B7 und B8)	x	x	x	x	x	x	x	x	x									

b) Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ (Regel 19 – 36)

ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG, R19-36)		Bedingungskombinationen																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
B1	AS = Unterlast	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n
B2	AS = Überlast	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n
B3	AS = Blockade	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j	n	n	j
B4	NF = Unterlast	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n
B5	NF = Überlast	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n
B6	NF = Blockade	n	n	n	n	n	n	j	j	j	n	n	n	n	n	n	j	j	j
B7	$0 < PQ < SW_{Bearbeitung}$	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
B8	PQ <= 0	j	j	j	j	j	j	j	j	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n
B9	FA wird transportiert	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
A1	FA bearbeiten	x	x	x	x	x	x				x	x	x			x			
A2	FA nicht bearbeiten							x	x	x				x	x		x	x	x
A3	Error (B7 und B8)																		

Abbildung 63: Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ wobei die Bedingungskombinationen, in welchen sich der FA im Transportstatus befindet, nicht berücksichtigt sind

Handelt es sich *nicht* um den letzten Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags, so ist die Prüfung hinsichtlich der akzeptierten Termintoleranz obsolet (Bedingung 6 in Abbildung 62). Dafür muss der Zustand des entsprechenden Nachfolgerarbeitssystems mit berücksichtigt werden. Das Nachfolgerarbeitssystem ist durch den Operationsfolgeplan des Fertigungsauftrags bekannt (Fertigungsauftragsliste, siehe Abbildung 54 in 4.4.2). Somit lauten die zur Entscheidung notwendigen Bedingungen:

- Zustand des Arbeitssystems (Bedingung B1 bis B3)
- Zustand des Nachfolgerarbeitssystems je betrachteter Fertigungauftrag (Bedingung B4 bis B6)
- Prio-Quotient des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingung B7 und B8)
- Transportzustand des betrachteten Fertigungsauftrags (Bedingung B9)

Die insgesamt neun Bedingungen der resultierenden Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ ergeben theoretisch 512 ($=2^9$) mögliche Kombinationen. Um die in Abbildung 63 dargestellte Entscheidungstabelle übersichtlich zu halten sind wiederum alle unmöglichen Kombinationen, welche den Zustand des Arbeitssystems und des Nachfolgers beschreiben, a priori weggelassen. Ebenso sind die Bedingungskombinationen, welche in der neunten Bedingung die Ausprägung „ja“ ausweisen, weggelassen. Diese Fertigungsaufträge werden zum aktuellen Zeitpunkt zur Warteschlange des Arbeitssystems transportiert (siehe Definition in Abschnitt 2.2.2). Es ergeben sich somit $3 * 3 * 1 * 2^{(9-3-3-1)} = 3 * 3 * 1 * 2^2 = 36$ Kombinationsmöglichkeiten.

Den Prio-Quotienten betreffend (Bedingungen B7 und B8 in Abbildung 63) gelten dieselben Bemerkungen wie zur Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“. Die mit der Entscheidungstabelle zu bestimmenden Aktionen lauten analog zur Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“ entweder „FA bearbeiten“ oder „FA nicht bearbeiten“. Bei der dritten Aktion (A3), die in Abbildung 63 aufgeführt ist, handelt es sich um eine Fehlermeldung. Sie ergibt sich infolge einer unmöglichen Bedingungskombination (zusätzlich zu den bereits ausgeschlossenen). Der Prio-Quotient kann nicht gleichzeitig einen Wert zwischen 0 und dem Schwellwert $SW_{Bearbeitung}$ annehmen und einen Wert kleiner 0 (Regel 1 bis 9). Die für den Fehler entscheidenden Ausprägungen der Bedingungen 7 und 8 sind in Abbildung 63 dunkelgrau hinterlegt.

4.6. Berücksichtigung aller Situationen

Unter speziellen Zuständen sind Situationen im Fertigungsablauf zu verstehen, die entweder zu einem Dead lock führen oder mit den bis zu diesem Zeitpunkt erläuterten Verfahrensregeln nicht abgedeckt sind. Aus diesem Grund werden in einem ersten Schritt die bislang bekannten Regeln auf Vollständigkeit geprüft.

4.6.1. Analyse der Vollständigkeit

Für die Analyse der Vollständigkeit werden die Elemente eines abstrahierten Fertigungssystems, wie sie in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt wurden, in einer Beziehungstypenmatrix abgebildet. Die Elemente in der ersten (linken) Spalte der Matrix sind die Absendertypen („von“-Elemente) und die Elemente in der obersten Zeile der Matrix stellen die Empfängertypen dar („nach“-Elemente). Die Zellen der resultierenden Matrix repräsentieren die möglichen Materialflussbeziehungsarten eines Fertigungssystems. In der Umsetzung werden die Materialflussbeziehungen durch Transporte realisiert (siehe Abschnitt 4.3.1). Damit tatsächlich sämtliche Materialflusskonstellationen identifiziert werden können, werden jene Elemente, die in einem Fertigungssystem mehrfach vorhanden sein

können, jeweils zweimal aufgeführt. Das ist für die Arbeitssysteme sowie die externen Dienstleister der Fall. Der Reihe nach wird die Matrix mit zwei unterschiedlichen Sichten betrachtet: in einem ersten Schritt werden die theoretisch möglichen Beziehungstypen eingetragen (Gesamtheit), in einem darauf folgenden zweiten Schritt wird analysiert, ob die theoretisch möglichen Beziehungstypen durch die bisher bekannten Regeln abgedeckt werden (Vollständigkeit).

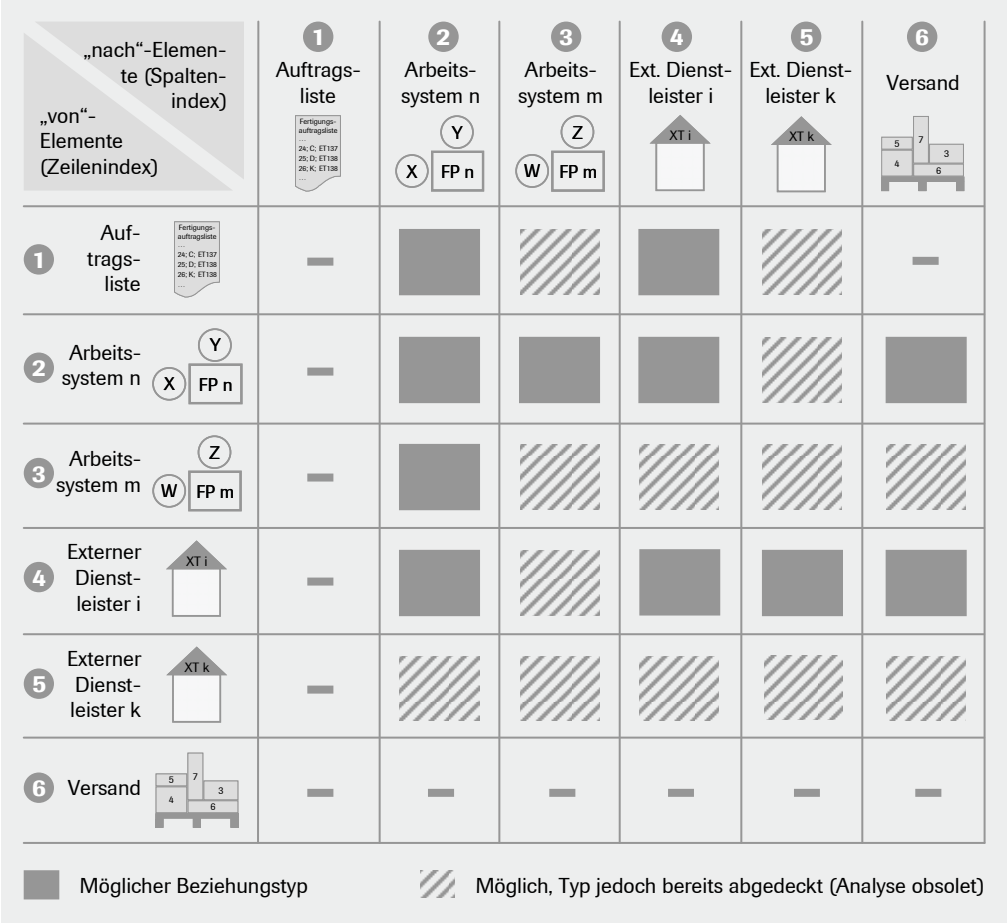


Abbildung 64: Gesamtheit der Beziehungsmöglichkeiten unter den Elementen eines Fertigungssystems in der Beziehungstypenmatrix

In Abbildung 64 ist die Beziehungstypenmatrix der Elemente eines Fertigungssystems dargestellt. Im Sinne der Gesamtheit der möglichen Beziehungsarten sind alle realistischen Beziehungstypen unter den Elementen mit Vierecken in den entsprechenden Zellen markiert. Durch die doppelte Aufführung der Arbeitssysteme (n und m) sowie der externen Dienstleister (i und k) kann es vorkommen, dass gewisse Beziehungstypen identisch sind. Beispielsweise ist die Beziehung von einem Arbeitssystem n zum Versand vom Typ her identisch wie die Beziehung eines anderen Arbeitssystems m zum Versand. In diesen Wiederholungsfällen sind die Vierecke schraffiert dargestellt. Sie sind im Rahmen der Untersuchung auf Vollständigkeit nicht weiter zu berücksichtigen. Die erste Spalte der Beziehungstypenmatrix in Abbildung 64 bleibt leer, da es keine Beziehungstypen gibt, bei welchen die Quelle der Empfänger (das „nach"-Element) darstellt. Aus analogen Überlegungen bleibt die letzte Spalte der Beziehungstypenmatrix ebenfalls leer (die Senke kann kein „von"-Element eines Beziehungstyps sein). Schlussendlich bleibt auch die Zelle leer, welche den Beziehungstyp zwischen Quelle und Senke darstellt (siehe Abbildung 64, oben rechts), da ein solcher Fertigungsauftrag keine Wertschöpfung erfahren würde.

Im zweiten Schritt wird geprüft, ob die ausgewiesenen Beziehungstypen mit den bereits bekannten Regeln abgedeckt sind. Das Ergebnis der Vollständigkeitsanalyse ist in Abbildung 65 darge-

stellt. Der Umfang der Analyse beschränkt sich, wie bereits weiter oben erwähnt, auf die Beziehungsarten, die durch ein ausgefülltes Viereck dargestellt sind. Falls der Beziehungstyp durch die Regeln abgedeckt ist, so ist das Viereck mit einem Haken versehen. Nicht gelöste Beziehungstypen sind durch ein Kreuz markiert. Diese Beziehungstypen sowie spezielle Aspekte der bereits gelösten Beziehungstypen werden im Folgenden diskutiert. Die Beziehungstypen sind zur besseren Orientierung mit den Zellenkoordinaten ergänzt („Zeilenindex“, „Spaltenindex“).

„nach“-Elemente (Spaltenindex) / „von“-Elemente (Zeilenindex)	1 Auftragsliste	2 Arbeitssystem n (Y, X, FP n)	3 Arbeitssystem m (Z, W, FP m)	4 Ext. Dienstleister i (XT i)	5 Ext. Dienstleister k (XT k)	6 Versand
1 Auftragsliste	–	✓ (1, 2)		✗ (1, 4)		–
2 Arbeitssystem n (Y, X, FP n)	–	✓ (2, 2)	✓ (2, 3)	✗ (2, 4)		✓ (2, 6)
3 Arbeitssystem m (Z, W, FP m)	–	✓ (3, 2)				
4 Externer Dienstleister i (XT i)	–	✓ (4, 2)		✓ (4, 4)	✓ (4, 5)	✓ (4, 6)
5 Externer Dienstleister k (XT k)	–					
6 Versand	–	–	–	–	–	–

Möglicher Beziehungstyp Möglich, Typ jedoch bereits abgedeckt (Analyse obsolet)

Abbildung 65: Ergebnis der Analyse auf Vollständigkeit sämtlicher Beziehungstypen in einem Fertigungssystem

Beziehungstyp (1, 4): Fertigungsauftragsliste – Externer Dienstleister

Falls der erste Operationsschritt eines Fertigungsauftrags durch einen externen Dienstleister (XT) durchgeführt wird, so kann der Fertigungsauftrag mit den bisher erläuterten Regeln nicht freigegeben werden. Die „ET Auftragsfreigabe“ wird ausschliesslich durch Arbeitssysteme benutzt. Die externen Dienstleister unterliegen nicht dem Steuerungseinfluss des Fertigungssystems und können konsequenterweise auch keine Fertigungsaufträge freigeben (siehe Abschnitt 4.3.1).

➔ Problem: FA mit dem ersten Operationsschritt extern werden nicht freigegeben.

➔ Lösung: Jeder FA, der in die Auftragsliste eingetragen wird, durchläuft zum Zeitpunkt des Eintrags eine Prüfroutine. Diese untersucht, ob der erste AVG durch ein zum System gehörendes AS durchgeführt wird. Falls dies nicht der Fall ist, so wird der Operationsplan um eine Operation ergänzt, welche an erste Stelle gesetzt wird. Der AVG wird durch ein virtuelles Arbeitssystem AS_{virt} durchgeführt. Die Auftragszeit beträgt 0. So ist es möglich, solche FA mit den bislang bekannten Verfahrensregeln abzuwickeln. Es ist keine Erweiterung des Regelwerks notwendig.

Beziehungstyp (2, 2): Arbeitssystem n – Arbeitssystem n

Der Umgang mit Arbeitsvorgängen, die unmittelbar aufeinanderfolgend auf demselben AS durchgeführt werden, ist durch die „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG) vollständig beschrieben.

➔ Problem: Falls sich das AS n im Zustand Blockade befindet besteht mit den bislang definierten Regeln die Möglichkeit eines System-Deadlocks (z.B. falls sich in der Warteschlange des AS n ausschliesslich FA befinden, deren Nachfolger das AS n ist).

➔ Lösung: Die Einführung eines virtuellen Arbeitssystems löst diese Problematik nicht. Würde man diesen potentiellen Konflikt durch Einführung eines virtuellen Arbeitssystems AS_{virt} beheben, so generierte man gemäss Abbildung 64 die Beziehungstypen (3, 2) und (2, 3). Die Lage entschärfte sich lediglich dahingehend, dass es zusätzliche Fertigungsaufträge mit der Charakteristik der unmittelbaren Wiederholoperation auf demselben Arbeitssystem benötigte, um das Fertigungssystem zu blockieren.

Im Falle einer unmittelbaren Wiederholoperation auf demselben Arbeitssystem kommt die Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ zum Einsatz. Sie setzt auf der nach Dringlichkeit sortierten Warteschlange des Arbeitssystems auf. Falls im Rahmen der Zustandsermittlung des Nachfolgerarbeitssystems festgestellt wird, dass es sich um dasselbe Arbeitssystem handelt, so soll der Fertigungsauftrag für die Bearbeitung freigegeben werden. Diese Regelergänzung wird auf den Fall eingeschränkt, dass sich das Arbeitssystem im Zustand „Blockade“ befindet. Durch die vorgängige Sortierung der Warteschlange ist gewährleistet, dass es sich um den dringendsten Fertigungsauftrag handelt.

Mit dieser Regelergänzung reduziert sich der Istbestand des Arbeitssystems nach Abschluss des Arbeitsvorgangs. Gleichzeitig wird die Auftragszeit des nächsten Arbeitsvorgangs zum Istbestand dazugezählt, da es sich um dasselbe AS handelt. Womöglich befindet sich das AS erneut im Zustand Blockade (abhängig vom Verhältnis der Auftragszeiten). Dafür befindet sich nun ein FA in der Warteschlange, dessen Nachfolgerarbeitssystem nicht mehr dasselbe ist und die drohende Systemblockade wird durchbrochen.

Beziehungstyp (2, 4): Arbeitssystem n – Externer Dienstleister i

Ein externer Dienstleister unterliegt nicht dem Steuerungseinfluss des Fertigungssystems. Infolge fehlenden Steuerbestands verfügt er auch über keinen Zustand. Es wurde bereits weiter oben angenommen, dass im Falle einer externen Bearbeitung die Rüst- und Auftragszeit durch eine feste, im Vertrag mit dem Dienstleister vereinbarten, Durchlaufzeit ersetzt wird. Diese beinhaltet ebenso die Transportdauer und die externen Liegezeiten.

➔ Problem: Der Beziehungstyp (2, 4) wird in der „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ nicht berücksichtigt

➔ Lösung: Basis für die Anwendung der „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ stellt die nach Dringlichkeit sortierte Warteschlange des Arbeitssystems dar (siehe Abschnitt 4.5.3). Im Rahmen der Anwendung dieser ET wird der Zustand des Nachfolgers ermittelt. Stellt sich dabei heraus, dass es sich beim Nachfolger um einen externen Dienstleister handelt, so kann der FA in jedem Fall bearbeitet werden. Die Begründung dazu basiert auf dem Umstand, dass die Warteschlange der Dringlichkeit nach sortiert wurde und es sich in dem Fall um den dringendsten FA handelt.

Beziehungstyp (3, 2): Arbeitssystem m – Arbeitssystem n

Die (unidirektionalen) Beziehungen zwischen zwei unterschiedlichen Arbeitssystemen sind durch Beziehungstyp (2, 3) abgedeckt. Mit der Aufführung des Typen (3, 2) wird der bidirektionale Auftragsverkehr zwischen zwei AS verstanden. Dieser ist ebenfalls durch die „ET Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ definiert. Folgenden Spezialfall gilt es allerdings zu berücksichtigen:

➔ Problem: Sowohl das AS n als aus das AS m befinden sich im Zustand Blockade. Die Warteschlange n beinhaltet ausschliesslich FA für das AS m und umgekehrt. Es resultiert ein System-Deadlock.

➔ Lösung: Entweder der Typ (2, 3) oder der Typ (3, 2) wird eliminiert (sinnvollerweise wird jener Typ mit der schwächeren Frequenz aufgehoben). Dies erfolgt ebenfalls durch Einführung eines virtuellen Arbeitssystems AS_{virt}. D.h., alle Fertigungsaufträge, welche in ihrem Operationsplan die AS-Reihenfolge (AS m nach AS n) ausweisen, werden um einen Operationsschritt erweitert. Dieser Operationsschritt erfolgt zwischen den Operationen durch das AS m und AS n und wird durch das AS_{virt} durchgeführt (Rüst- und Auftragszeit betragen je 0). Durch diese Massnahme ist auch dieser Beziehungstyp mit den bislang bekannten Verfahrensregeln abgedeckt. Es ist keine Erweiterung des Regelwerks notwendig.

Die Lösung ist zwar ineffizient (der Durchsatz sinkt), dafür ist keine Erweiterung des Regelwerks notwendig. Die Situation tritt dann ein, wenn viele Fertigungsaufträge innerhalb einer beschränkten Zeitperiode bidirektionalen Auftragsverkehr zwischen zwei AS verursachen. Die oben beschriebene Lösung bedingt eine Untersuchung des Fertigungssystems anhand der Operationspläne. In einer Transportmatrix (analog Abbildung 64, die Elemente allerdings durch die effektiven AS ersetzt) können die Beziehungen erfasst werden. Falls gilt Zelle (i, j) $>$ 0 und Zelle (j, i) $>$ 0 ist die Einführung eines virtuellen Arbeitssystems notwendig.

Beziehungstyp (4, 2): Externer Dienstleister i - Arbeitssystem n

Die Beziehung zwischen einem externen Dienstleister und dem Arbeitssystem n ist durch das bislang bekannte Regelwerk implizit gegeben: nach der Bearbeitung durch den Dienstleister (resp. nach Ablauf der Durchlaufzeit) wird der FA ins Fertigungssystem geliefert und zählt ab diesem Zeitpunkt zum Bestand des nächsten AS gemäss Operationsplan. Dies ist selbst dann der Fall, wenn sich das betreffende AS gegenwärtig im Zustand Blockade befindet.

➔ Problem: Keines

➔ Lösung: Erledigt

Beziehungstypen (4, 4) und (4, 5): Externer Dienstleister i – Externer Dienstleister i/k

Die Beziehung zwischen zwei externen Dienstleister ist durch das Regelwerk implizit abgedeckt. Analog dem Beziehungstyp (4, 2) kann der Transport nach der Bearbeitung durch den Dienstleister durchgeführt werden. Beim Dienstleister, der den folgenden AVG durchführt, kann es sich sowohl um denselben als auch einen anderen Dienstleister handeln. Die Gefahr eines System-Deadlocks durch bidirektionalen Auftragsverkehr, analog den Arbeitssystemen gemäss Beziehungstyp (3, 2), besteht nicht. Die externen Dienstleister verfügen über keinen Blockadezustand.

➔ Problem: Keines

➔ Lösung: Erledigt

Beziehungstyp (4, 6): Externer Dienstleister i – Versand

Ebenfalls ist die Beziehung zwischen einem externen Dienstleister i und dem Versand durch das bislang bekannte Regelwerk implizit gegeben: nach der Bearbeitung durch den Dienstleister (resp. nach Ablauf der Durchlaufzeit) wird der FA ins Fertigungssystem geliefert. Anstatt dass der FA zum Bestand eines FA zählt wird er direkt in den Versand weitergeleitet (in Abbildung 50 als Senke dargestellt). Sollte der Versand entgegen diesem Verständnis nicht über eine „unendliche" Kapazität verfügen, so gilt es das Fertigungssystem anders abzugrenzen und den Versand als AS darzustellen. Es resultiert in diesem Fall der Beziehungstyp (4, 2).

➔ Problem: Keines

➔ Lösung: Erledigt

4.6.2. Das leere Fertigungssystem

Die Definition und der Einsatzzweck des Steuerbestands wird in Abschnitt 4.4.3 erläutert. Im selben Abschnitt wird auch definiert, dass der Steuerbestand periodisch (täglich) für die unmittelbar folgende Periode ermittelt wird.

Die Bearbeitung der Aufgaben durch die Arbeitssysteme gemäss Abschnitt 4.3.2 wird im Unterschied zum Steuerbestand nicht periodisch, sondern ereignisorientiert angestossen (siehe Abschnitt 4.3.3). In Abbildung 58 sind als mögliche Anstossereignisse das Bearbeitungsende eines Arbeitsvorgangs und der Kalendertageswechsel genannt. Eine Mindestfrequenz der Aufgabendurchführung ist somit sichergestellt und entspricht der periodischen Berechnung des Steuerbestands. Bei geringer Auftragslast (d.h. es befinden sich wenige FA im Umlauf und somit resultiert auch eine kleine Anzahl Ereignisse) sind Qualitätseinbussen der Verfahrensgüte naheliegend.

Um dieser Tatsache entgegen zu wirken, sind zwei Massnahmen vorgesehen:

- Erweiterung des Verständnisses des Begriffs „Ereignis"
- Einführung eines Weckers zur Gewährleistung einer Mindestfrequenz (> Kalendertageswechsel)

Erweiterung des Verständnisses des Begriffs „Ereignis"

Bislang wurde im Zusammenhang mit dem Entwurf einer Steuerungs- und Regelungsstrategie unter dem Begriff „Ereignis" primär das Bearbeitungsende eines AVG verstanden. Dies ist insofern sinnvoll, dass genau zu diesem Zeitpunkt die Entscheidungsfindung durch ein AS notwendig ist. Beträgt der Istbestand eines AS zu einem bestimmten Zeitpunkt 0, so ist das AS von den anderen AS abhängig, die durch dieses Ereignis die Bearbeitung der Aufgaben anstossen. Je mehr AS eine leere Warteschlange haben, desto geringer wird die entsprechende Frequenz. Deshalb sollen folgende Ereignisse, zusätzlich zum Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG" und zum „Kalendertageswechsel", die Aufgabenbearbeitung anstossen:

- Ende einer Störung
- Beginn einer neuen Schicht
- Ende der Pause

Die Durchführung des Aufgabenblocks „Auftragsfreigabe" ist auf alle diese Ereignisse folgend sinnvoll. Die Durchführung des Aufgabenblocks „Auftragsbearbeitung" ist obsolet, falls das Arbeitssystem zum Ereigniszeitpunkt bereits einen Fertigungsauftrag bearbeitet. Diese Prüfung ist in Abbildung 66 berücksichtigt, welche die Aufgabensynchronisation nach Variante P15 beinhaltet (siehe auch Abschnitt 4.5.2 und Abbildung 59).

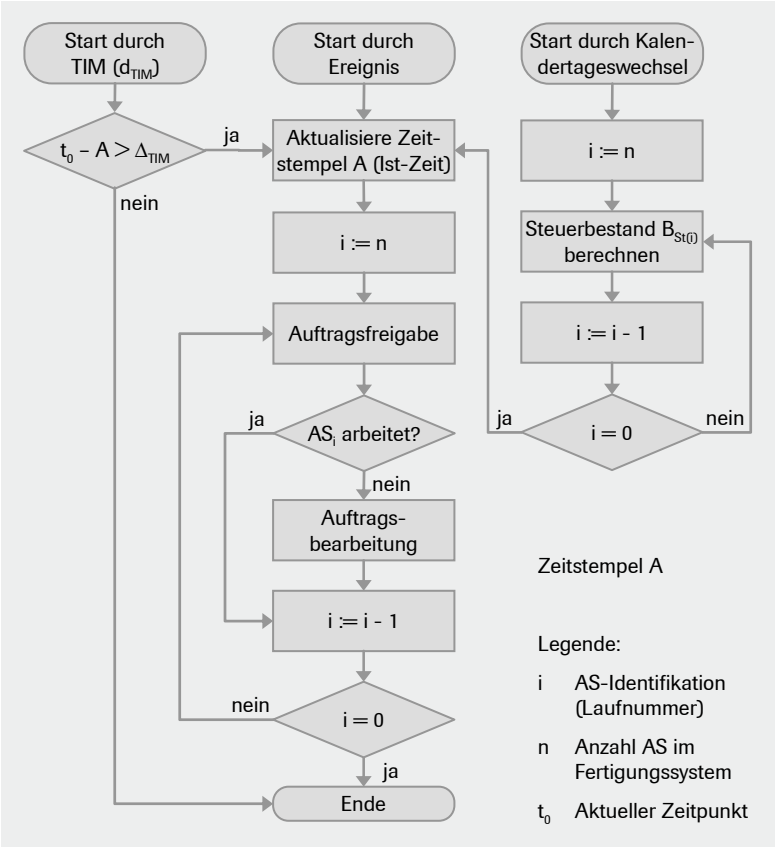


Abbildung 66: Aufgabensynchronisation nach Variante P15 inkl. Prüfung der Durchführung des Aufgabenblocks „Auftragsbearbeitung“, Zeitstempel A und Integration von TIM

Einführung eines Weckers zur Gewährleistung einer Mindestfrequenz

Durch das Ereignis Kalendertageswechsel und die Erweiterung des Verständnisses des Begriffs „Ereignis“ ist sichergestellt, dass die Durchführung der Aufgabenblöcke mehr als einmal pro BKT angestossen wird. Durch die Einführung von TIM (Kurzform von „timer“) kann diese Frequenz erhöht werden. TIM benötigt zwei Variablen:

- Aktivierungsintervall d_{TIM}
- Akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt Δ_{TIM}

Jeweils nach Ablauf des Aktivierungsintervalls d_{TIM} prüft TIM den Zeitpunkt, zu welchem die Aufgabenbearbeitung zum letzten Mal angestossen wurde. Das setzt voraus, dass dieser Zeitpunkt registriert wird. In Abbildung 66 wurde die Aufgabensynchronisation mit der Aktualisierung des Zeitstempels A ergänzt. Liegt der Wert des Zeitstempels A weiter in der Vergangenheit als die akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt Δ_{TIM}, so wird die Aufgabenbearbeitung durch TIM angestossen. Andernfalls nicht.

4.7. Überblick über den Entwurf

4.7.1. Zusammenfassung der Funktionsweise

In periodischen Abständen (täglich) wird pro Arbeitssystem der Steuerbestand ermittelt (siehe Abschnitt 4.4.3). Der Steuerbestand wird anhand der Fertigungsaufträge in der Fertigungsauftragsliste ermittelt und berücksichtigt somit die Auftragslast und die Auftragsstruktur. Er bildet für das Arbeitssystem eine Vorgabe für die Folgeperiode und dient als Führungsgrösse.

Das Arbeitssystem regelt seinen Bestand anhand dieser Führungsgrösse. Dazu werden Entscheidungstabellen verwendet (siehe Abschnitt 4.5.3), welche die Aufgabenblöcke Auftragsfreigabe und Auftragsbearbeitung lösen. Neben der Führungsgrösse Steuerbestand werden zusätzlich die Auftragsprioritäten in Form des Prio-Quotienten (siehe Abschnitt 4.4.1) und die Zustände des Nachfolgerarbeitssystems (siehe Abschnitt 4.4.5) berücksichtigt.

Das Verfahren benötigt an Informationen die Operationsreihenfolge der Fertigungsaufträge. Pro Operation müssen das durchführende Arbeitssystem sowie die Auftragszeit (Rüst- und Einzelzeit) bekannt sein. Ausserdem wird pro Fertigungsauftrag der Endtermin benötigt, unabhängig davon, wie dieser festgelegt wurde (Prognose-, Verbrauchs oder Kundenauftrag). *Das Verfahren benötigt keine zusätzlichen planerisch ermittelten Werte (Planstarttermin, Arbeitsvorgangterminierung,…).* Sollten solche Planwerte durch die übergeordnete Planung zusätzlich festgelegt worden sein, so ist dies für das Verfahren nicht hinderlich. Diese Werte werden einfach nicht verwendet.

4.7.2. Charakteristiken des Verfahrens

Folgende Charakteristiken zeichnen das Verfahren zusätzlich aus:

- Das Verfahren orientiert sich am Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (siehe Abbildung 4). Der Ursprung der Fertigungsaufträge (Prognose-, Verbrauchs- oder Kundenaufträge) ist für den Einsatz des Verfahrens irrelevant.
- Die Nachfrageintensität durch den Absatzmarkt wird indirekt berücksichtigt (über die in der Fertigungsauftragsliste enthaltenen Fertigungsaufträge). Abweichungen zum effektiven Marktbedarf werden durch Instanzen ausserhalb des Einflussbereichs der Steuerung verursacht (z.B. durch die Planung).
- Die Auslastung der Arbeitssysteme ist ein Ergebnis der Auftragslast und des Zustands des Fertigungssystems. Betriebskosteneinsparungen werden realisiert, indem pro Arbeitssystem nicht nur entschieden wird, welcher Fertigungsauftrag bearbeitet werden soll, sondern auch geprüft wird, ob überhaupt gearbeitet werden soll.
- Das Verfahren verhält sich robust in sämtlichen Lastsituationen. Sowohl die Situation eines leeren Fertigungssystems als auch eine Überlastsituationen (mehr Fertigungsaufträge als möglich) werden durch die Verfahrensregeln abgedeckt.
- Das Verfahren ermöglicht der Planung den Einsatz von weniger Stammdaten. Insbesondere die Verwendung der diversen Planübergangszeiten ist für das Verfahren nicht erforderlich. Es resultiert ein reduzierter Aufwand aufgrund geringerer Stammdatenpflege (Effektivität). Die Algorithmen in der Planung vereinfachen sich in der Regel durch die obsolete Kapazitäts- und Durchlaufterminierung (Effizienz).
- Eil- und Expressaufträge (sogenannte Vorstandsaufträge) werden regelkonform bearbeitet (keine Sonderhandhabung neben dem Regelwerk des Tagesgeschäfts).

4.7.3. Erweiterungsmöglichkeiten des Funktionsumfangs

Der vorgestellte Entwurf einer Steuerungs- und Regelungsstrategie deckt die notwendigen Aktivitäten eines Fertigungssystems ab. Dies wird in Abschnitt 5.3 im Rahmen von Industrievergleichen nachgewiesen. Nahliegende Erweiterungen des Funktionsumfangs sind u.a.:

- Funktion „Losgrössenbildung“
- Kapazitätensteuerung

Diese zwei Punkte werden u.a. im Abschnitt 6.2 kommentiert.

4.7.4. Wichtige Verfahrensparameter

Im Zusammenhang mit der Vorstellung der Verfahrensregeln in den vorangehenden Abschnitten wurden bestimmte Verfahrensparameter verwendet. Sie wurden jeweils begründet und definiert. An dieser Stelle werden die wichtigsten Parameter noch einmal aufgeführt und ihre Wirkweise im Rahmen des Verfahrens zusammengefasst:

η : Limitierungsfaktor des Steuerbestands

➔ Defaultwert η: 0.99 [-] (mit $0 < \eta \leq 1$)

Bei der Berechnung des Steuerbestands kann es sein, dass die ermittelte Leistungsforderung über oder knapp unterhalb der maximal möglichen Leistung des betrachteten AS liegt. Im letzteren Fall müsste die Elimination der letzten Prozente der mittleren Leistungsverluste mit hohen, mittleren Beständen „erkauft“ werden. Damit steigt auch die mittlere Durchlaufzeit. Mit dem Limitierungsfaktor wird eine Obergrenze für die Leistungsforderung des AS in Abhängigkeit der maximal möglichen Leistung gesetzt. Dadurch werden im Vergleich zur mittleren Leistung überproportional zunehmende mittlere Durchlaufzeiten verhindert. Bei Verwendung des angegebenen Defaultwerts resultiert ein maximal möglicher Steuerbestand, der knapp das 3.2-fache des idealen Mindestbestands beträgt (bei Verwendung des Streckfaktors $\alpha = 10$). Siehe dazu auch den Abschnitt 4.4.3.

ν : Dimensionierungsfaktor des Blockadebestands

➔ Defaultwert ν: 5 [-] (mit $\nu \in \Re$)

Die Arbeitssysteme verhalten sich bezüglich der Aufgabenbearbeitung zustandsbedingt. Das setzt voraus, dass der Zustand eines Arbeitssystems eindeutig definiert ist. Dies erfolgt anhand des Wertes des Istbestands. Dementsprechend ist es notwendig, den Bestand in Wertebereiche zu gliedern. Dies erfolgt mit dem Steuerbestand (siehe oben) und dem Blockadebestand. Der Dimensionierungsfaktor des Blockadebestands legt fest, um das Wievielfache der Blockadebestand mehr beträgt als der mittlere, ideale Mindestbestand des Arbeitssystems. Mit dem angegebenen Defaultwert betragen die mittleren Auslastungsverluste weniger als 0.2 % ($\alpha = 10$) in Bezug auf die maximal mögliche Leistung.

$SW_{FA-Freigabe}$: Schwellwert für die Fertigungsauftragsfreigabe

➔ Defaultwert $SW_{FA-Freigabe}$: 1 [-]

Für die Entscheidung betreffend der Fertigungsauftragfreigabe wird unter anderem auch die Zugehörigkeit des Prio-Quotientenwerts zu einem bestimmten Wertebereich geprüft (siehe 4.5.3 und Abbildung 61). Für den Prio-Quotienten werden drei Wertebereiche unterschieden:

- $PQ < 0$
- $0 <= PQ < SW_{FA-Freigabe}$
- $PQ >= SW_{FA-Freigabe}$

Der Schwellwert für die Fertigungsauftragsfreigabe bildet demnach die Grenze zwischen zwei dieser drei Wertebereiche. Der Defaultwert des Schwellwerts für die Fertigungsauftragsfreigabe ist jener Wert, bei dem die dynamische Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags gleich der verbleibenden Dauer bis zum Sollendtermin des Fertigungsauftrags ist (siehe Abschnitt 4.4.1 und Abbildung

52). Die Parametrierung dieses Wertes in Form eines Schwellwerts erlaubt es, die Verhaltensweise der Steuerungs- und Regelungsstrategie konservativ resp. liberal auszulegen.

$SW_{Bearbeitung}$ *: Schwellwert für die Fertigungsauftragsbearbeitung*

➔ Defaultwert $SW_{Bearbeitung}$: 1 [-]

Der Sinn und Zweck des $SW_{Bearbeitung}$ in Bezug auf die Auftragsfreigabe wird im Zusammenhang der Aufgabe Auftragsbearbeitung durch den $SW_{Bearbeitung}$ wahrgenommen. Die Einführung eines separaten Schwellwerts ermöglicht es, die Verhaltensweise der Steuerungs- und Regelungsstrategie hinsichtlich der Auftragsbearbeitung unabhängig von der Auftragsfreigabe einzustellen. Siehe dazu den Abschnitt 4.5.3, die Abbildung 62 sowie die Abbildung 63.

Δ_{TT} *: Akzeptierte Termintoleranz*

➔ Defaultwert Δ_{TT} : 1 BKT

Die akzeptierte Termintoleranz unterstützt die Entscheidungsfindung betreffend der Bearbeitung, falls es sich beim betrachteten Fertigungsauftrag um den letzten AVG handelt. Im Falle, das der betrachtete Fertigungsauftrag zu früh zur Prüfung gelangt (PQ $>$ 1) kann mittels der akzeptierten Termintoleranz entschieden werden, ob eine sofortige Bearbeitung Auswirkungen auf die Zielgrösse Termintreue hat. Siehe dazu den Abschnitt 4.5.3 und die Abbildung 62.

Δ_{TIM} *: Akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt*

➔ Defaultwert Δ_{TIM} : 2 h

TIM ist ein periodisch gesteuerter Generator, der die Bearbeitung der Aufgabenblöcke durch die Arbeitssysteme anstösst. Wenn TIM die Aufgabenkette anstösst wird zuerst geprüft, wann die Bearbeitung der Aufgabenblöcke zum letzten Mal durchgeführt wurde. Dies erfolgt anhand eines Zeitstempels. Liegt die letzte Durchführung der Aufgabenblöcke weiter als Δ_{TIM} in der Vergangenheit, so aktiviert TIM den Ablauf. Andernfalls nimmt TIM keine Aktivierung des Ablaufs vor (siehe Abschnitt 4.6.2 und Abbildung 66).

4.7.5. Manuelle Eingriffsmöglichkeiten

Mit manuellen Eingriffsmöglichkeiten ist die Beeinflussung des Verfahrensverhaltens im laufenden Betrieb zu verstehen. Die Möglichkeiten werden im Folgenden kurz erörtert.

Mutation der Verfahrensparameter

Die wichtigsten Verfahrensparameter sind in Abschnitt 4.7.4 zusammengefasst. Diese können im laufenden Betrieb mutiert werden. Dies setzt eine umfassende Kenntnis über den Verfahrensablauf sowie die Wirkweise der Parameter voraus.

Anpassung der Auftragsdringlichkeit

In der Praxis entsteht oft die Notwendigkeit (oder das Bedürfnis), die Dringlichkeit eines Fertigungsauftrags zu verändern. Beim vorgestellten Verfahren wäre dies eine Anpassung des Prio-Quotienten. Diese Massnahme ist allerdings nicht wirkungsvoll, da beim nächsten Ereignis der Prio-Quotient des entsprechenden Fertigungsauftrags neu berechnet und die vorgenommene

Mutation somit überschrieben wird. Eine Anpassung der FA-Dringlichkeit kann über die Veränderung des Sollendtermins vorgenommen werden. Diese Veränderung wirkt direkt und ist ab dem nächsten Ereignis wirksam.

➔ Beachte: Nicht Einzelwerte, sondern der Systeminput wird mutiert (robustes Verfahren).

➔ Bemerke: Wird ein Fertigungsauftrag in die Auftragsliste mit einem Sollendtermin in der Vergangenheit eingetragen, so verhält er sich wie ein Eil-/Expressauftrag. Aufgrund der hohen Priorisierung wird er an jedem Arbeitssystem als nächster bearbeitet. Dies erfolgt jedoch immer auf Kosten (in Form von Übergangszeit) anderer Fertigungsaufträge in den jeweiligen Warteschlangen.

Anpassung der Kapazität eines Arbeitssystems

Die Kapazitäten der Arbeitssysteme werden durch das Steuerungs- und Regelungsverfahren nicht verändert (siehe Abschnitt 4.7.3). Sie sind fix und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht automatisch angepasst, da die entsprechende Umsetzung von der Organisationsflexibilität abhängt und somit fallspezifisch auszulegen ist (siehe Abschnitt 6.2.2). In der Praxis kann es sein, dass die Kapazitäten täglich angepasst werden. Eine solche Anpassung ist im Rahmen des vorgestellten Entwurfs möglich, indem die entsprechenden Stammdaten (Schichtkalender) manuell angepasst werden.

➔ Beachte: Sollte man die Schichtdauer (das Schichtmodell) eines Arbeitssystems punktuell ändern, so muss man sich bewusst sein, dass der aktuelle Steuerbestand nicht mit dem Kapazitätsangebot des AS übereinstimmt. Dies wird erst nach der nächsten Berechnung des Steuerbestands, also nach Ablauf der aktuellen Periode (Tag), der Fall sein.

5. Umsetzung des Entwurfs

Der in Abschnitt 4 vorgestellten Entwurf einer Steuerungs- und Regelungsstrategie soll mit Hilfe der Simulationstechnik validiert werden. Dazu wird das Verfahren mit einem dynamischen Simulator nachgebildet und anhand realer Daten zweier unterschiedlicher Unternehmen getestet.

5.1. Die Simulation

Die Simulation ist eine Vorgehensweise zur Analyse von Systemen, die für die theoretische oder formelmässige Behandlung zu kompliziert sind. Bei der Simulation werden die dynamischen Prozesse eines Systems in einem Modell abgebildet. Anschliessend werden am Modell Experimente durchgeführt. Das Ziel dabei ist es, mit dem experimentierbaren Modell zu Erkenntnissen zu gelangen, die sich auf die Wirklichkeit (zurück) übertragen lassen [VDI3633]. Man spricht von dem zu simulierenden System und von einem Simulator als Implementierung oder Realisierung eines Simulationsmodells. Letzteres stellt eine Abstraktion bezüglich Struktur, Funktion und Verhalten des zu simulierenden Systems dar. Der Ablauf des Simulators mit konkreten Werten (Parametrierung) bezeichnet man als Simulationsexperiment. Zu den Einsatzgebieten der dynamischen Simulation zählen neben Anderem hauptsächlich auch der Funktionsnachweis sowie die Funktionsauslegung und –optimierung. Acél zeigt für Letzteres eine zielorientierte Vorgehensweise, mit welcher der Parametersatz des optimalen Betriebpunkts effizient ermittelt werden kann [ACÉ96].

Aufgrund der ereignisorientierten Charakteristik des Verfahrens aus Abschnitt 4 bietet sich die ereignisorientierte Simulation an. Bei der ereignisorientierten Simulation erfolgt der Zeitfortschritt angestossen durch Zustands- oder Statusänderungen. Ein ereignisorientiertes Simulationsmodell kann eindeutig beschrieben werden durch ein Zustandsmodell, einen Ereigniskalender (oder eine Ereignisliste), Ereignisroutinen und die Zeit. Der Ereigniskalender enthält eine Liste zukünftiger Ereignisse mit dem Namen und der Art des Ereignisses sowie dem Zeitpunkt seines Eintretens. Dabei können bestimmte Ereignisse wiederum neue Ereignisse in der Zukunft auslösen. Somit können auch komplexe Verhalten simuliert werden. In der programmtechnischen Umsetzung wird die Ereignisliste nach dem Eintrittszeitpunkt sortiert und immer das als nächstes eintretende Ereignis abgearbeitet.

Als Simulator für die Validierung der Steuerungs- und Regelungsstrategie wird Plant Simulation (Version 8.2) der Firma UGS (Unigraphics Solutions GmbH) verwendet. Plant Simulation ist Bestandteil der Tecnomatix Produktfamilie von Siemens PLM Software. Das Produkt wird überwiegend in Produktion, Logistik und Engineering eingesetzt. Der Einsatz erfolgt in nahezu allen Wirtschaftszweigen, von der Automobilindustrie und deren Zulieferern, Anlagenbauern und Engineeringhäusern, über Werften bis hin zur Halbleiterindustrie und Banken, Versicherungen, Bahnbetreibern, Krankenhäusern, sowie in Forschung und Lehre. Bei den Anwendungen geht es vorrangig um die Auslegung und die Optimierung der Struktur sowie um die Dimensionierung und Steuerung von Produktionssystemen und Geschäftsprozessen. Plant Simulation ist eine vollständig objektorientierte Standardsoftware, mit der sich dynamische Systeme und Geschäftsprozesse bei Bedarf realitätsgetreu und in höchster Genauigkeit abbilden lassen.

Die hohe Flexibilität bei der Modellierung wird mit Plant Simulation u.a. dadurch erreicht, dass Material- und Informationsfluss unabhängig voneinander modelliert werden können. Gewünschte Verknüpfungen werden durch ein Sensor-Aktor-Prinzip erreicht: Am Eingang und Ausgang von aktiven Materialflussbausteinen sind Sensoren, die eine Steuerung aktivieren. Diese veranlasst frei definierbare Aktionen.

5.2. Das Modellkonzpet

5.2.1. Black-Box-Betrachtung

Die Absicht besteht darin, mit dem Simulationsmodell ein beliebiges Fertigungssystem darstellen zu können, das den Anforderungen der Abgrenzung entspricht (siehe Abschnitt 1.4.2). Das heisst, es muss sich um diskrete Fertigungsprozesse handeln (Stückgut).

Jedes Simulationsmodell setzt sich aus dem eigentlichen Systemabbild, welches es darstellt, sowie zusätzlichen Input- und Outputgrössen zusammen. Es ergibt sich in einer ersten Annahme eine Black-Box. In Abbildung 67 ist eine solche Black-Box-Darstellung mit den wesentlichen Eingangs- und Ausgangsgrössen dargestellt. Das durch die Simulation abgebildete System beinhaltet das produktionstechnische System.

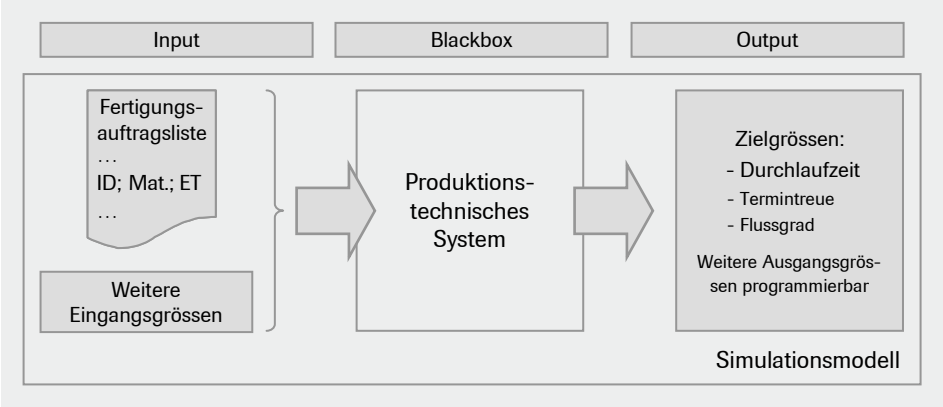


Abbildung 67: Black-Box-Darstellung des Simulationsmodells mit den wesentlichen Eingangs- und Ausgangsgrössen

Die zentrale Eingangsgrösse (Input) stellt die Fertigungsauftragsliste dar, welche durch die übergeordnete Instanz erstellt wurde. Somit entspricht der Modellaufbau in seinen Grundzügen dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung gemäss Abbildung 4. Der Aufbau resp. Inhalt der Fertigungsauftragsliste wurde im Abschnitt 4 partiell aufgegriffen. Er wird im Rahmen der Modellstruktur in Abschnitt 5.2.2 zusammenfassend und ganzheitlich dargestellt. Neben der Fertigungsauftragsliste sind weitere Eingangsdaten notwendig, welche ebenfalls im Rahmen der Modellstruktur erörtert werden.

Die zentralen Ausgangsgrössen (Output) bilden die Zielgrössen Durchlaufzeit und Termintreue (siehe Abschnitt 2.3). Die Beschränkung auf die beiden Marktziele ergibt sich aus der Zielverfolgung der Steuerungs- und Regelungsstrategie.

Die Zielgrösse Auslastung wird als Ergebnis der Auftragslast verstanden. Diese wird durch die Fertigungsauftragsliste und somit die übergeordnete Instanz vorgegeben. Falls marktseitig keine Erzeugnisse gefordert sind, für deren Herstellung ein bestimmtes Arbeitssystem ausschliesslich zur Verfügung steht, dann soll dieses Arbeitssystem auch nicht ausgelastet werden. Unter diesem Gesichtspunkt darf die Auslastung auch nicht als Zielgrösse aufgefasst werden.

Die Zielgrösse Bestand wird im Rahmen des Verfahrens als Regelgrösse verwendet. Die resultierende Zielgrösse im Sinne von Ware in Arbeit wird hingenommen: zu minimieren ist der Bestand um lange Durchlaufzeiten zu vermeiden, eine vollständige Elimination würde wiederholte Materialflussabrisse an den Engpassarbeitssystemen mit sich bringen und zu Auslastungsverlusten führen. Durch die Verfolgung von kurzen Durchlaufzeiten allerdings hält sich das Bestandsniveau in Grenzen, da aus der Trichterformel (2.21) bekannt ist, dass sich an einem Arbeitssystem der mittlere Bestand und die mittlere Durchlaufzeit proportional verhalten.

Neben den Marktzielen Durchlaufzeit und Termintreue wird ausserdem der Flussgrad gemäss (2.7) ausgewertet. Der Flussgrad bietet sich insbesondere bei Fertigungssystemen mit variierendem Arbeitsinhalt an, da er ein relatives Mass der Durchlaufzeit ist. Die Arbeitsinhaltsvarianz kann durch verschiedene Einzelbearbeitungszeiten, durch unterschiedliche Losgrössen oder durch eine uneinheitliche Anzahl Operationsfolgeschritte pro Fertigungsauftrag sowie sämtliche Kombinationen davon bedingt sein.

Aus der Abbildung 67 geht hervor, dass neben diesen drei Ausgangsgrössen weitere Ergebnisse erfasst werden können. Diese sind jeweils fallspezifisch zu definieren und die entsprechende Auswertung muss programmiert werden.

5.2.2. Die Modellstruktur

Die Struktur des Simulationsmodells ist in Abbildung 68 dargestellt und leitet sich aus der Black-Box-Betrachtung ab. Das Simulationsmodell besteht aus je einem Programmblock für Eingangs- und Ausgangsgrössen. Der produktionstechnische Bereich (in Abbildung 67 als Black-Box eingeführt) ist aufgelöst in einen Steuerungsblock und einen Materialflussblock. Ein User Interface im Simulationsmodell ermöglicht es mittels Schreibberechtigung, Eingangsgrössen zu definieren. Zusätzlich besteht für die Bedienenden die Möglichkeit, sämtliche Informationen und Ergebnisse jederzeit aus den drei anderen Programmblöcken mittels Leseberechtigung zu beziehen.

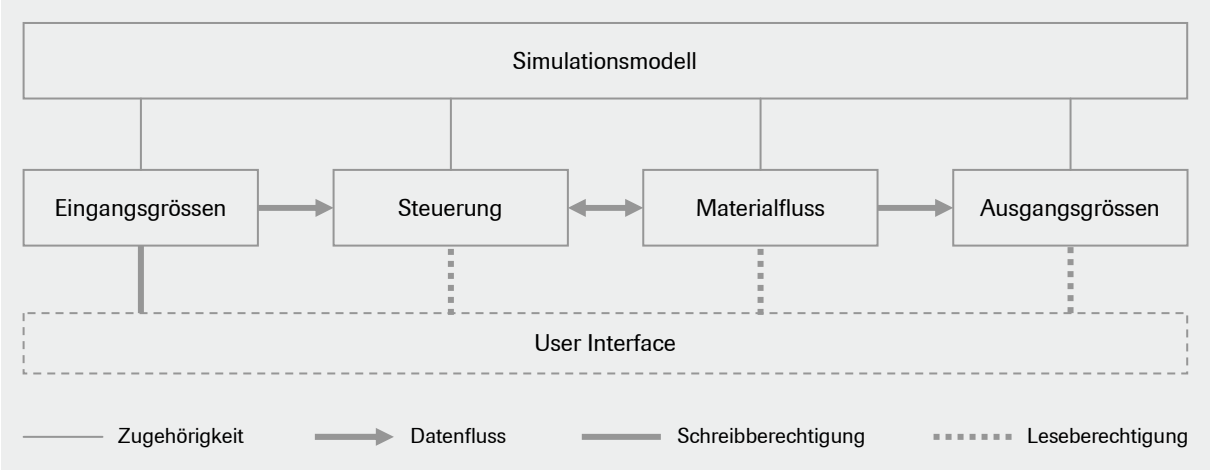


Abbildung 68: Struktur des Simulationsmodells mit dem Hauptdatenfluss

In der Abbildung 68 ist ausserdem der Datenfluss zwischen den Modellblöcken dargestellt. Die Steuerung bezieht die parametrierten Eingangsgrössen zu Beginn eines Simulationsexperiments. Während eines Simulationsexperiments herrscht ein Datenfluss zwischen der Steuerung und dem Materialfluss. Die (definierten) Ausgangsgrössen werden laufend erfasst. Am Ende des Simulationsexperiments werden die notwendigen Berechnungen der Ausgangsgrössen durchgeführt (z.B. Ermittlung von Mittelwerten).

5.2.3. Der Programmblock Eingangsgrössen

In Abschnitt 5.2.1 wurde die Fertigungsauftragsliste als zentrale Eingangsgrösse aufgeführt. Zur Durchführung eines Simulationsexperiments sind zusätzliche Eingangsgrössen notwendig. Sie werden an dieser Stelle aufgelistet und im Folgenden beschrieben:

- Ein Betriebskalender
- Schichtmodelle der Arbeitssysteme

- Transportzeiten zwischen den Arbeitssystemen
- Stammdaten

Fertigungsauftragsliste

In der Fertigungsauftragsliste sind die Fertigungsaufträge zusammengefasst (siehe Abbildung 69). Neben den operativen Informationen wie Identifikationsnummer des Fertigungsauftrags, Operationsfolgenummer, Arbeitssystem, Auftragszeit pro Arbeitssystem und Endtermin werden in der Fertigungsauftragsliste weitere Datenfelder geführt (siehe auch Abschnitt 4.4.2 resp. Abbildung 54). Diese Datenfelder sind in der Fertigungsauftragsliste als Eingangsgrösse leer, im Raster jedoch bereits enthalten. Die Abbildung 69 zeigt die Fertigungsauftragsliste als Eingangsgrösse mit sämtlichen Datenfeldern und dem entsprechenden Datenformat der Einträge. In dieser Fertigungsauftragsliste ist ein beispielhafter Fertigungsauftrag mit der Identifikation SM102 enthalten.

FA	AS_{OP10}	$d_{RZ(10)}$	$d_{BZ(10)}$	…	AS_{OP300}	$d_{RZ(300)}$	$d_{BZ(300)}$	Endtermin	Q_{FA}	S_{FA}	Freigabe	Beendet	Transport
[string]	[integer]	[time]	[time]		[integer]	[time]	[time]	[integer]	[real]	[time]	[boolean]	[boolean]	[boolean]
…													
SM102	AS2	1:13.0	3:47.9	…	AS31	0:29.0	1:25.0	237	-	-	-	-	-
…													

Abbildung 69: Die Eingangsgrösse „Fertigungsauftragsliste“ mit sämtlichen Datenfeldern (wovon gewisse zu Beginn noch leer sind) und den entsprechenden Datentypen sowie einem Beispieleintrag

Die Auftragszeit d_{ZAU} pro Operationsfolgeschritt wird unterteilt in Rüstdauer d_{RZ} und Bearbeitungsdauer d_{BZ}. Durch diese Struktur ist die Möglichkeit offen gehalten, zu einem späteren Zeitpunkt den Einfluss von unterschiedlichen Losgrössen zu analysieren. Die in Abbildung 69 dargestellte Struktur ermöglicht es, Fertigungsaufträge mit z.B. 30 Operationsfolgeschritten abzubilden. Falls mehr Operationsfolgeschritte erforderlich sind kann die Struktur der Fertigungsauftragsliste entsprechend angepasst werden.

Zu Beginn eines Simulationsexperiments wird die Fertigungsauftragsliste in den Programmblock Steuerung kopiert und als „Fertigungsauftragsliste_operativ“ gespeichert. Die Steuerung mutiert die Einträge in der operativen Kopie (an zentraler Stelle). Arbeitsvorgänge, die durchgeführt wurden, werden durch die Steuerung auf Null gesetzt und die Spalten Prio-Quotient, Fertigungsauftragsschlupf, Freigabe, Beendet und Transport werden ereignisorientiert aktualisiert (siehe Abschnitt 5.2.5).

Betriebskalender

Der Betriebskalender legt die eindeutige Zusammenhörigkeit von Kalenderdatum und Betriebskalendertag (BKT) fest. Im Betriebskalender sind auch die Feiertage enthalten. Als Feiertag gelten jene Kalendertage, die nicht als Arbeitstag (Betriebskalendertag) definiert sind. Die Datumsspanne, welche der Betriebskalender umfasst, muss mindestens so gross sein wie die Dauer des Simulationsexperiments.

Schichtmodelle der Arbeitssysteme

Für jedes Arbeitssystem wird ein separates Schichtmodell geführt. Es besteht aus 7 Zeitblöcken, die sich individuell parametrieren lassen. In der Summe müssen sie immer 24 Stunden betragen (siehe Abbildung 70):

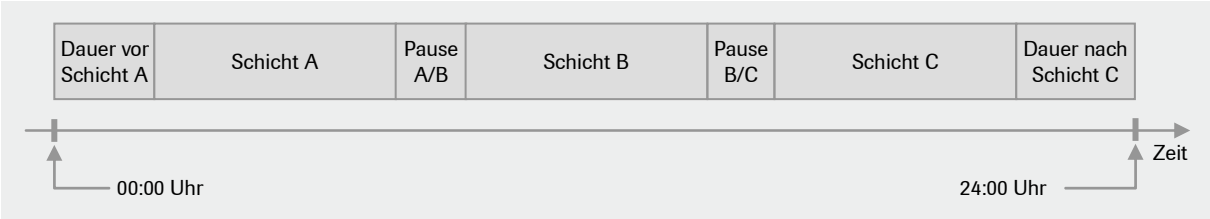


Abbildung 70: Das Schichtmodell eines Arbeitssystems setzt sich aus sieben Zeitblöcken zusammen, die in der Summe 24 Stunden betragen müssen

Im Falle eines Betriebsmodells mit weniger als drei Schichten werden die entsprechenden Schicht-Zeitblöcke mit der Dauer Null parametriert und die Dauer vor/nach Schicht entsprechend angepasst, damit die Summe wieder 24 h beträgt.

Die arbeitssystemspezifische Führung eines Schichtmodells bedingt im Rahmen der Definition der Eingangsgrösse einen Mehraufwand. Allerdings sind damit die Voraussetzungen geschaffen, das Simulationsmodell zu einem späteren Zeitpunkt mit einer Kapazitätssteuerung zu ergänzen.

Zusätzlich zu den Zeitblöcken muss für jedes Arbeitssystem festgelegt werden, ob es an Feiertagen arbeitet oder nicht. Diese Differenzierung ist beispielsweise beim Einsatz von Automaten sinnvoll.

Transportzeiten zwischen den Arbeitssystemen

Gemäss Definition in Abschnitt 2.2.2 zählt ein abgeschlossener Arbeitsvorgang bestandsmässig bereits zum Nachfolgerarbeitssystem, selbst wenn das Los noch transportiert werden muss. In der Simulationsabbildung wird ein FA unmittelbar nach Bearbeitungsende in die Warteschlange des Nachfolgerarbeitssystems befördert. Ein Eintrag in der Fertigungsauftragsliste (siehe Abbildung 69, letzte Spalte) signalisiert dem Nachfolgerarbeitssystem, ob der FA bereits verfügbar oder aufgrund eines Tranports gesperrt ist. Zur Bestimmung des Transportendes (Zeitpunkt, ab welchem der FA für das Nachfolgerarbeitssystem verfügbar ist) sind zwei Informationen notwendig:

- Dauer des Transports
- Startzeitpunkt des Transports

Diese Informationen werden in je einer Transportmatrix als Eingangsgrössen definiert. Eine Transportmatrix ist eine Materialflussmatrix, welche anstelle des mengenmässigen Zusammenhangs die für den Transport benötigte Dauer resp. den Startzeitpunkt des Transports zwischen Quellen und Senken (den Arbeitssystemen) aufzeigt. Der Raster der beiden Transportmatrizen umfasst neben den Arbeitssystemen auch externe Dienstleister, die Fertigungsauftragsliste (Quelle) sowie den Versand (Senke).

Falls die Transportdauer zwischen zwei Elementen vernachlässigbar ist, so wird die entsprechende Zelle in der Matrix leer gelassen. Der Startzeitpunkt eines Transportes ist entweder sofort (die Zelle ist leer) oder orientiert sich an einem Shuttlefahrplan (z.B. immer dienstags und donnerstags um 08.00 Uhr). Dazu können beliebig viele unterschiedliche Shuttlefahrpläne definiert werden.

Mit diesen Eingangsdaten lassen sich beliebige Transportmuster zwischen zwei Elementen darstellen. Es können neben den vernachlässigbaren Transportzeiten sowohl sämtliche innerbetriebliche Transportarten (innerhalb derselben Fertigungshalle als auch gebäudeübergreifend) wie auch alle überbetrieblichen Transportmuster (anderer Standort, Drittfirma, etc.) definiert werden.

Stammdaten

Zu den Stammdaten zählen unter anderem die Verfahrensparameter, die in Abschnitt 4.7.4 zusammengefasst worden sind. Sie lauten:

- Limitierungsfaktor des Steuerbestands
- Dimensionierungsfaktor des Blockadebestands
- Schwellwert für die Fertigungsauftragsfreigabe
- Schwellwert für die Fertigungsauftragsbearbeitung
- Akzeptierte Termintoleranz
- Akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt

Weitere Stammdaten, die zur Durchführung eines Simulationsexperiments notwendig sind, lauten:

- Aktivierungsintervalle d_{TIM1} bis d_{TIM3} pro Simulationsexperiment (Abschnitte 4.6.2 und 5.2.5)
- Streckfaktor α pro Arbeitssystem (siehe Abschnitt 2.5.3)
- Start des Auswertungszeitraums pro Simulationsexperiment
- Ende des Auswertungszeitraums pro Simulationsexperiment

Grundsätzliches zu den Eingangsgrössen

Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Eingangsgrössen werden in Tabellen oder Listen definiert und als solche über das Userinterface in das Simulationsmodell einkopiert. Beim Start eines Simulationsexperiments werden die Eingangsgrössen aus den einkopierten Tabellen oder Listen gelesen. D.h., dass eine vorgängig vorgenommene manuelle Änderung einer Eingangsgrösse mit dem Start des Simulationsexperiments durch den Wert aus der einkopierten Tabelle oder Liste überschrieben wird. Mit dieser Massnahme soll die Reproduzierbarkeit der Simulationsexperimente sichergestellt und die Archivierung der Eingangsgrössen zusammen mit den Outputgrössen vereinfacht werden.

5.2.4. Der Programmblock Materialfluss

Im Materialflussblock erfolgt die physische Abwicklung der Fertigungsaufträge. Dazu sind folgende Elemente notwendig (siehe Abschnitt 4.6.1):

- 1 Quelle
- n Arbeitssysteme
- m Dienstleister
- 1 Senke

Die Grössen n und m hängen vom betrachteten Fertigungssystem ab und sind somit gegeben.

Quelle und Senke

Sowohl die Quelle als auch die Senke sind Materialflussbausteine, die im verwendeten Simulator enthalten sind. Die Aktivierung der Quelle erfolgt über die Steuerung (siehe Abschnitt 5.2.5). Dabei wird eine bewegliche Einheit generiert, die einen Fertigungsauftrag darstellt. Die auftragsspezifischen Informationen werden als Attribute der beweglichen Einheit gespeichert.

Arbeitssystem

Ein Arbeitssystem setzt sich, wie in Abschnitt 2.3.1 (Abbildung 8) vorgestellt, aus einem Funktionsplatz (Ressource) und der dazugehörenden Warteschlange (Puffer) zusammen. In der Simulationsabbildung werden diese durch zwei unterschiedliche Materialflussbausteine dargestellt: einem Pufferbaustein und einem Einzelarbeitsplatzbaustein. Die Abbildung 71 stellt ein standardisiertes Arbeitssystem n dar, wie es in der Simulationsabbildung umgesetzt ist.

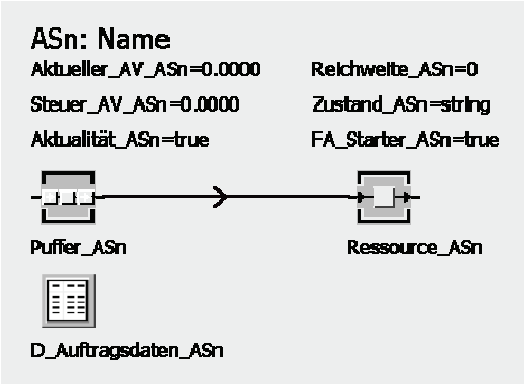


Abbildung 71: Simulationsabbildung eines Arbeitssystems (print screen)

- Der Puffer_ASn

  Der Puffer ist ein Materialflussbaustein, der durch mehrere bewegliche Einheiten belegt werden kann. Die Bearbeitungsdauer (Verweildauer) ist auf 0 gesetzt. Gelangt eine bewegliche Einheit von einem Vorgängerelement in den Puffer, so wird der Arbeitsvorrat (Aktueller_Arbeitsvorrat_ASn) aktualisiert und anschliessend die Aktualitätsvariable (Aktualität_ASn) auf „true“ gesetzt. Letztere wurde durch das Vorgängerelement auf „false“ gesetzt. Ausserdem wird der Fertigungsauftrag in die Tabelle (D_Warteschlange_ASn) eingetragen (nur FA-Identifiktation, Prio-Quotient und Auftragsschlupf).

- Die Ressource_ASn

  Die Ressource ist ein Materialflussbaustein, der durch maximal eine bewegliche Einheit (Fertigungsauftrag) belegt werden kann. Wenn eine bewegliche Einheit abgegeben wird, wird der Arbeitsvorrat (Aktueller_Arbeitsvorrat_ASn) aktualisiert, die Aktualitätsvariable des Nachfolgers m (Aktualität_ASm) auf „false“ gesetzt (falls es sich beim Nachfolgerelement um ein Arbeitssystem handelt), der Eintrag des Fertigungsauftrags in der Tabelle (D_Auftragsdaten_ASn) gelöscht und der Steuerungsablauf angestossen (siehe Abschnitt 5.2.5). Ausserdem wird die Auftragszeit des soeben beendeten Fertigungsauftrags in der operativen Kopie der Fertigungsauftragsliste auf Null gesetzt. Die Steuerung bestimmt aus den verbleibenden Auftragsdaten (D_Auftragsdaten_ASn) den als nächstes zu bearbeitenden Fertigungsauftrag. Wenn dieser bestimmt ist, wird die entsprechende bewegliche Einheit aus dem Puffer auf die Ressource umgelagert und die Steuerung liest die entsprechende Auftragszeit aus der Fertigungsauftragsliste und setzt sie im Baustein Ressource_ASn ein.

In der Simulationsabbildung gehören ausserdem noch der Name des Arbeitssystems, Steuerungsdaten sowie eine Tabelle mit den aktuellen Auftragsdaten zum Arbeitssystem (siehe Abbildung 71). Auf eine nähere Beschreibung dieser Elemente wird verzichtet, da die Notwendigkeit sowie die Verwendung dieser durch die Ausführungen in Abschnitt 4 und Abschnitt 5.2.5 abgedeckt sind.

Dienstleister

Der Aufbau eines Dienstleisters entspricht jenem eines Arbeitssystems. Da der Dienstleister nicht im steuerungstechnischen Einfluss des betrachteten Fertigungssystems steht verfügt er auch über keine Variablen (Aktueller_AV, Steuer_AV, Reichweite, Zustand, FA_Starter und Aktualität).

5.2.5. Der Programmblock Steuerung

Im Block Steuerung erfolgt die eigentliche Umsetzung der Steuerungs- und Regelungsstrategie. Die Abbildung 72 stellt die Funktionsweise der Steuerungs- und Regelungsstrategie in einem Ablaufdiagramm dar. Dieses Ablaufdiagramm ist umfassender als jenes in Abbildung 66 (siehe Abschnitt 4.6.2), da zusätzlich zu den durch die Arbeitssysteme zu bearbeitenden Aufgaben auch die Steuerungsfunktionalitäten sowohl integriert als auch synchronisiert sind.

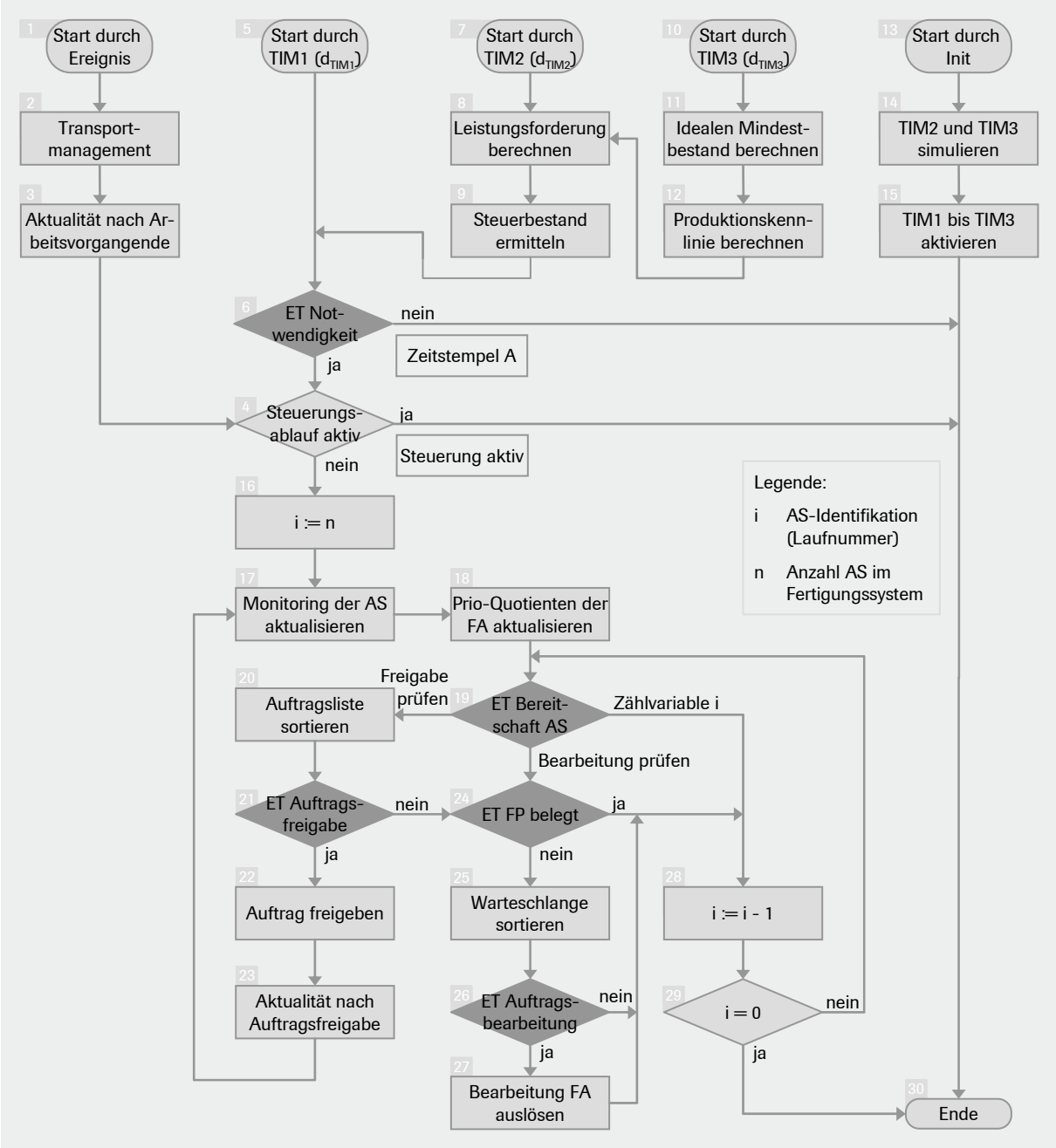


Abbildung 72: Ablaufdiagramm der Steuerungs- und Regelungsstrategie, wie sie im Simulationsmodell umgesetzt ist (dunkel hinterlegte Entscheidungen erfolgen durch Entscheidungstabellen)

Die Synchronisation der Steuerungs- und Regelungsaktivitäten erfolgt mittels Steuermarken. Diese werden im Steuerungsblock aufgrund von Ereignissen an den definierten Quellen generiert und durchlaufen das Ablaufdiagramm. Die Steuermarke löst die entsprechenden Aktivitäten. An Stellen mit mehreren Ausgängen ist es Gegenstand der Aktivität den zu verfolgenden Pfad festzulegen. Der Durchlauf der Steuermarke von Start bis Ende (für ASn bis AS1) benötigt keinen Zeitbedarf und erfolgt in der Zeitspanne $\Delta t = 0$. Am Ende eines Durchlaufs wird die Steuermarke in einer Senke vernichtet.

Die Steuerungsfunktionalitäten werden periodisch (zeitbasiert) ausgelöst. Aus diesem Grund benötigt es im Unterschied zur Abbildung 66 zusätzliche TIM-Funktionen, welche den Anstoss der Steuerungsaktivitäten sicherstellen.

Falls Entscheidungen im Ablaufdiagramm von mehr als einer Bedingung abhängig sind, so werden diese mittels Entscheidungstabellen gefällt. In Abbildung 72 sind diese Fälle dunkelgrau hinterlegt. Zwei der insgesamt fünf Entscheidungstabellen wurde im Abschnitt 4.5.3 bereits vorgestellt.

Die Steuerung greift unter anderem auf Informationen, die in Form von Eingangsgrössen (siehe Abschnitt 5.2.3) definiert wurden. Dazu zählt auch die Fertigungsauftragsliste. Sie wird beim Start des Simulationsexperiments kopiert und als operative Fertigungsauftragsliste geführt. Darin werden durch die Steuerung zum Teil auch Einträge mutiert, wie sich in der Erklärung des Ablaufs noch zeigen wird. Durch die Kopie der Fertigungsauftragsliste könnte das Simulationsexperiment unmittelbar nach Ende erneut gestartet werden, da die Originalinformationen der Fertigungsauftragsliste nach wie vor vorhanden sind und erneut in die operative Kopie eingelesen werden könnten.

Element 1: *Start durch Ereignis*

Der Regelungsablauf wird durch Ereignisse angestossen (siehe Abschnitt 4.6.2). Im Abschnitt 5.2.4 wurde erläutert, dass die „Ressource_ASn“ nach Beendigen eines Arbeitsvorgangs den Steuerungsablauf aktiviert. Zeitgleich wird die bewegliche Einheit (Fertigungsauftrag) durch den Materialflussbaustein (Ressource_ASn) zum Nachfolger verlegt und dessen Aktualitätsvariable auf „false“ gesetzt.

Element 2: *Transportmanagement*

Der Steuerungsablauf wird durch eine Steuermarke durchlaufen, welche die Fertigungsauftragsnummer des auslösenden FA als Attribut gespeichert hat. Im Transportmanagement wird geprüft, ob zwischen den Materialflusselementen (Vorgänger und Nachfolger), zwischen denen sich der auslösende Fertigungsauftrag gegenwärtig befindet, eine Transportdauer definiert wurde und zu welchem Zeitpunkt der Transport ausgeführt wird (siehe Abschnitt 5.2.3, Transportzeiten zwischen den Arbeitssystemen). Falls eine Transportdauer vorliegt wird in der operativen Kopie der Fertigungsauftragsliste der Zelleneintrag des entsprechenden Fertigungsauftrags in der Transportspalte auf „true“ gesetzt (siehe Abbildung 69, letzte Spalte). Gleichzeitig wird eine Erinnerung aktiviert, welche den Transportstatus nach Ablauf der Dauer auf „false“ setzt. Gemäss Definition in Abschnitt 2.2.1 (Abbildung 5) zählt der Fertigungsauftrag bestandsmässig bereits zum Nachfolger. Dies wird durch die Aktualisierung der Variable „Aktueller_Arbeitsvorrat_ASn“ direkt im Materialflussblock vorgenommen (siehe Abschnitt 5.2.4).

Element 3: *Aktualität nach Arbeitsvorgangende*

Der Steuerungsablauf (Weitergabe der Steuermarke) wird am Fortgang gehindert, bis sämtliche Aktualitätsvariablen der Arbeitssysteme über den Wert „true“ verfügen. Das bedeutet, dass sämtliche Arbeitsvorratsvariablen aktualisiert wurden.

Bem.: Diese Aktion erfolgt in der Zeitspanne $\Delta t = 0$ und bezweckt lediglich die Synchronisation aller Aktivitäten, die zum selben Zeitpunkt anfallen.

Element 4: *Steuerungsablauf aktiv*

Es wird geprüft, ob sich zwischen diesem Punkt des Ablaufs und dem Ende des Ablaufs bereits eine Steuermarke befindet. Diese Prüfung erfolgt anhand der Variable „Steuerung_aktiv“ [boolean]. Falls der Wert der Prüfvariable „true“ ist, wird die Steuermarke über den Ausgang „ja“ zum Ende des Ablaufs befördert. Falls der Wert der Prüfvariable „false“ lautet wird diese auf „true“ gesetzt und die Steuermarke gelangt über den Ausgang „nein“ zum nächsten Schritt.

Element 5: *Start durch TIM1 (d_{TIM1})*

Die Aktivierung des Steuerungsablaufs mittels TIM1 wurde bereits im Abschnitt 4.6.2 erläutert. Mit TIM1 soll sichergestellt werden, dass im Falle von wenigen Ereignissen (z.B. in einem leeren Fertigungssystem) die Steuerungsaktivitäten trotzdem periodisch durchgeführt werden.

Element 6: *Entscheidungstabelle Notwendigkeit*

In Abschnitt 4.6.2 (Abbildung 66) wurde die Notwendigkeit der Aktivierung des Steuerungsablaufs anhand der Prüfung eines Zeitstempels A [datetime] vorgestellt. In der Simulationsumsetzung des Steuerungsablaufs werden zur Entscheidung weitere Kriterien herangezogen. Sie lauten:

- TIM1 aktiviert Steuerungsablauf
- Quelle der Steuermarke = TIM1

In Abschnitt 5.2.3 wurde erklärt, dass die zeitgetriebene Aktivierung des Steuerungsablaufs mittels TIM1 grundsätzlich ausgeschaltet werden kann. Dies ist mit dem Stammdatum „TIM1 aktiviert Steuerungsablauf“ [boolean] möglich. Weiter wird geprüft, ob die auslösende Steuermarke effektiv von TIM1 stammt oder womöglich von TIM2 resp. TIM3 generiert wurde. Die resultierende Entscheidungstabelle ist in der Abbildung 73 dargestellt.

ET Notwendigkeit		Bedingungskombinationen							
		1	2	3	4	5	6	7	8
B1	$t_0 - A > \Delta_{TIM1}$	n	j	n	n	j	j	n	j
B2	TIM1 aktiviert Ablauf	n	n	j	n	j	n	j	j
B3	Jetonquelle = TIM1	n	n	n	j	n	j	j	j
A1	Ablauf aktivieren (ja)								x
A2	Abl. nicht aktiv. (nein)	x	x	x	x	x	x	x	

Abbildung 73: Entscheidungstabelle „Notwendigkeit“ zum Aktivieren des Steuerungsablaufs

Bem.: Mit einer entsprechenden Parametrierung der Entscheidungstabelle „ET Notwendigkeit“ ist es möglich, dass auch TIM2 oder TIM3 den Steuerungsablauf analog aktivieren.

Element 7: *Start durch TIM2 (d_{TIM2})*

Die Aktivierung von TIM2 erfolgt analog TIM1 (zeitgetrieben), allerdings mit einem unabhängigen Stammdatum *Aktivierungsintervall d_{TIM2}*. Dieses Intervall entspricht der Tagesdauer (24 h). Eine *Akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt* Δ_{TIM2} ist nicht notwendig, da die beabsichtigten Steuerungsfunktionalitäten *Leistungsforderung berechnen* und *Steuerbestand ermitteln* immer nach der Aktivierung ausgeführt werden sollen. Es wird ebenfalls eine Steuermarke generiert.

Element 8: *Leistungsforderung berechnen*

Für jedes Arbeitssystem wird die Leistungsforderung der Folgeperiode berechnet. Die Vorgehensweise wurde in Abschnitt 4.4.3 (Abbildung 55) erläutert.

Element 9: *Steuerbestand ermitteln*

Für jedes Arbeitssystem wird der Steuerbestand ermittelt, der sich aus der vorgängig berechneten Leistungsforderung ergibt. Die Vorgehensweise wurde in Abschnitt 4.4.3 (Abbildung 56) erläutert. Dazu wird durch die Steuerung eine Produktionskennlinie pro Arbeitssystem verwaltet.

Element 10: *Start durch TIM3 (d_{TIM3})*

Die Aktivierung von TIM3 erfolgt analog TIM1 (zeitgetrieben), allerdings ebenfalls mit einem unabhängigen Stammdatum *Aktivierungsintervall d_{TIM3}*. Eine *Akzeptierte Abweichung vom aktuellen Zeitpunkt Δ_{TIM3}* ist nicht notwendig, da die beabsichtigten Steuerungsfunktionalitäten *Idealer Mindestbestand berechnen* und *Produktionskennlinie berechnen* immer nach der Aktivierung ausgeführt werden sollen. Es wird ebenfalls eine Steuermarke generiert.

Element 11: *Idealen Mindestbestand berechnen*

Für jedes Arbeitssystem wird der ideale Mindestbestand berechnet. Die Vorgehensweise wurde in Abschnitt 2.5.2 (Abbildung 17) erläutert. Grundlage zur Berechnung des idealen Mindestbestands bilden die Auftragszeiten der Fertigungsaufträge aus der operativen Fertigungsauftragsliste. Die abgearbeiteten Vorgabezeiten sind in dieser auf Null gesetzt (siehe Abbildung 54) und werden somit bei der Ermittlung des aktuellen, idealen Mindestbestands nicht berücksichtigt.

Element 12: *Produktionskennlinie berechnen*

Die Steuerung verwaltet für jedes Arbeitssystem eine Produktionskennlinie. Nach der Berechnung (Aktualisierung) des idealen Mindestbestands werden diese Produktionskennlinien ebenfalls aktualisiert. Sie dienen einerseits zur Ermittlung des Steuerbestands als auch zum Herauslesen der Reichweiten der Arbeitssysteme in Abhängigkeit derer aktueller Bestandssituation.

Mit einer neuen (aktualisieren) Produktionskennlinie ist der Steuerbestand ebenfalls neu zu berechnen. Deshalb werden unmittelbar anschliessend die entsprechenden Funktionen aktiviert.

Element 13: *Start durch Init*

Die Aktivierung erfolgt durch den Start des Simulationsexperiments und ist somit einmalig. Es wird eine Steuermarke generiert.

Element 14: *TIM2 und TIM3 simulieren*

Es werden initial die Funktionen in der synchronen Reihenfolge aufgerufen, die während des Ablaufs des Simulationsexperiments ansonsten durch die von TIM2 oder TIM3 erzeugten Steuermarke aktiviert werden.

Element 15: *TIM1 bis TIM3 aktivieren*

Nachdem die Funktionen, welche während des Verlaufs des Simulationsexperiments durch TIM2 und TIM3 angestossen werden, initial durchgeführt wurden, gilt es, TIM1 bis TIM3 zu aktivieren. Dies erfolgt in Abhängigkeit der als Eingangsgrössen definierten *Aktivierungsintervalle* (siehe „Stammdaten“ in Abschnitt 5.2.3).

Element 16: $i := n$

Jede Steuermarke, unabhängig von der Quelle (Start), die bis zu diesem Zeitpunkt nicht zur Senke geleitet wurde, läuft über diesen Punkt. Zwischen diesem Punkt und der Senke (Ende) kann sich maximal eine Steuermarke befinden. Es werden die Aufgaben, die durch die Arbeitssysteme durchgeführt werden (Regelungsteil), bearbeitet (siehe Abschnitt 4.5.2). Diese Aufgaben werden für jedes Arbeitssystem i, beginnend mit der höchsten Identifikationsnummer n, einzeln durchgeführt.

Element 17: *Monitoring der AS aktualisieren*

Vor Aktivierung des Steuerungsablaufs können Materialflussbewegungen stattgefunden haben (die Aktualisierung der Arbeitsvorräte wurde bereits sichergestellt) oder der Steuerbestand wurde neu berechnet. Entsprechend den neuen Werten werden die Variablen *Zustand* und *Reichweite* ermittelt. Die Aktualisierung der Monitoringwerte erfolgt für alle Arbeitssysteme (AS1 bis ASn), da die Reichweiten der Arbeitssysteme die Prio-Quotienten beeinflussen und somit Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung haben.

Element 18: *Prio-Quotienten der FA aktualisieren*

Sowohl der Prio-Quotient als auch der Auftragsschlupf aller Fertigungsaufträge, die noch nicht beendet sind, werden berechnet. Dies erfolgt in der Fertigungsauftragsliste (siehe Abbildung 69).

Element 19: *Entscheidungstabelle Bereitschaft AS*

ET Bereitschaft AS		Bedingungskombinationen							
		1	2	3	4	5	6	7	8
B1	AS ist aktiv?	n	j	n	n	j	j	n	j
B2	AS ist in Störung?	n	n	j	n	j	n	j	j
B3	AS ist FA_Starter?	n	n	n	j	n	j	j	j
A1	Freigabe prüfen						x		
A2	Bearbeitung prüfen		x						
A3	Zählvariable i	x		x	x	x		x	x

Abbildung 74: Entscheidungstabelle „Bereitschaft AS“ für einen effizienten Steuerungsablauf

Um den Ablauf effizient zu gestalten wird mittels einer Entscheidungstabelle geprüft, ob die Aufgabenbearbeitung durch das ASi zum aktuellen Zeitpunkt überhaupt notwendig ist. Dies geschieht gemäss Abbildung 74.

Bem.: Die Variable „FA_Starter“ wird pro Arbeitssystem geführt (siehe Abschnitt 5.2.4, Abbildung 71). Der Wert (true oder false) wird initial ermittelt und gibt an, ob das Arbeitssystem bei mindestens einem der Fertigungsaufträge den ersten Operationsschritt durchführt.

Element 20: *Auftragsliste sortieren*

Die Tätigkeit „Auftragsliste sortieren“ ist eine Vorbereitungsarbeit für die Prüfung der Auftragsfreigabe durch das ASi. Die Liste wird anhand der Prio-Quotienten derart sortiert, dass der dringlichste Fertigungsauftrag an erster Stelle der Auftragsliste steht. Dabei werden nur Fertigungsaufträge berücksichtigt, die einerseits noch nicht freigegeben sind und andererseits als ersten Operationsschritt das ASi durchlaufen. Die notwendigen Informationen sind in (der operativen Kopie) der Fertigungsauftragsliste vorhanden (siehe Abschnitt 5.2.3, Abbildung 69).

Element 21: *Entscheidungstabelle Auftragsfreigabe*

Anhand der sortierten Auftragsliste wird geprüft, ob der dringlichste (erste) FA freigegeben werden soll/muss. Die entsprechenden Kriterien und der Ablauf sind im Abschnitt 4.5.3 erläutert. Die Entscheidungstabelle „Auftragsfreigabe“ (siehe Abbildung 61) verfügt entsprechend über zwei Ausgänge: FA freigeben und FA nicht freigeben.

Element 22: *Auftrag freigeben*

Entsprechend der definierten Aktion in der vorangehenden Entscheidungstabelle wird die Steuermarke weitergeleitet und veranlasst die Auftragsfreigabe. Es wird eine bewegliche Einheit auf der Quelle im Materialflussblock erzeugt. Die Quelle führt die notwendigen Aktivitäten ab diesem Moment autonom aus (z.B. auftragsspezifischen Attribute auf der beweglichen Einheit festlegen, siehe Abschnitt 5.2.4, Quelle und Senke). Ausserdem wird in der operativen Kopie der Fertigungsauftragsliste beim entsprechenden Fertigungsauftrag die Freigabe eingetragen (Spalte „Freigabe“, siehe Abbildung 69).

Element 23: *Aktualität nach Auftragsfreigabe*

Aufgrund der durchgeführten Auftragsfreigabe verändert sich der Arbeitsvorrat des ASi. Der Steuerungsablauf (Weitergabe der Steuermarke) wird am Fortgang gehindert, bis die Aktualitätsvariablen aller Arbeitssysteme über den Wert „true“ verfügen. Dadurch wird sichergestellt, dass die folgenden Aktivitäten durch die Steuerung aufgrund aktueller Werte erfolgen.

Die Steuermarke wird weitergeleitet zum bereits durchlaufenen *Monitoring der AS aktualisieren*. Durch die Auftragsfreigabe ändert infolge des angestiegenen Arbeitsvorrats am ASi die Reichweite des ASi. Diese Änderung wirkt sich auf die Prio-Quotienten aller FA aus, die in ihrem Operationsplan über das ASi verfügen (vor oder auch nach Auftragsfreigabe).

Der Loop der Auftragsfreigabe (siehe Abbildung 72) kann für das ASi mehrmals durchlaufen werden. Pro Durchlauf wird genau ein FA freigegeben. Falls aufgrund des angestiegenen Arbeitsvorrats oder der Prio-Quotienten kein FA (mehr) freigegeben werden kann (Aktion *FA nicht freigeben*), so wird die Steuermarke nach der Entscheidungstabelle Auftragsfreigabe an die Entscheidungstabelle FP belegt weitergeleitet.

Bem.: Diese Aktion erfolgt in der Zeitspanne $\Delta t = 0$ und bezweckt lediglich die Synchronisation aller Aktivitäten, die zum selben Zeitpunkt anfallen (analog *Aktualität nach Arbeitsvorgangende*).

Element 24: *Entscheidungstabelle FP belegt*

Um die Aufgabe der Auftragsbearbeitung nicht unnötig durchzuführen wird erneut mittels Entscheidungstabelle festgelegt, in welchem Fall dies sinnvoll ist (Effizienz des Steuerungsablaufs). In Abbildung 75 ist die resultierende Entscheidungstabelle dargestellt:

ET FP belegt		Bedingungen			
		1	2	3	4
B1	FP ist belegt?	n	j	n	j
B2	Arbeitsvorrat > 0?	n	n	j	j
A1	Warteschlange sort.			x	
A2	Zählvariable i	x			x
A3	Fehlermeldung		x		

Abbildung 75: Entscheidungstabelle „FP belegt“

Nur in dem Fall, bei dem der FP frei ist und der aktuelle Arbeitsvorrat grösser Null beträgt, ist die Prüfung der Auftragsbearbeitung zweckmässig (Regel 3).

Element 25: *Warteschlange sortieren*

Die Sortierung der Warteschlange ist die Umsetzung der Aufgabe „Wahl des zu bearbeitenden FA“. Die Sortierkriterien, welche auf die Fertigungsaufträge in der Warteschlange des ASi angewendet werden, wurden in Abschnitt 4.5.3 erläutert.

Element 26: *Entscheidungstabelle Auftragsbearbeitung*

Anhand der sortierten Warteschlange wird der Reihe nach geprüft, welcher FA bearbeitet werden soll. Die entsprechenden Kriterien und der Ablauf sind im Abschnitt 4.5.3 erläutert: in Abhängigkeit des Operationsplans des betrachteten Fertigungsauftrags wird die Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“ (siehe Abbildung 62) oder die Entscheidungstabelle „Auftragsbearbeitung (nicht letzter AVG)“ (siehe Abbildung 63) verwendet. Falls die Bearbeitung eines FA entschieden ist oder sämtliche FA der Warteschlange geprüft wurden, wird die Steuermarke weitergegeben. Entsprechend verfügt die Entscheidungstabelle über zwei unterschiedliche Ausgänge (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63, jeweils Aktionen A1 und A2).

Element 27: *Bearbeitung FA auslösen*

Entsprechend der definierten Aktion in der vorangehenden Entscheidungstabelle wird die Steuermarke weitergeleitet und löst die Bearbeitung des FA aus. In dieser Aktion wird der gewählte FA aus der Warteschlange auf den FP befördert, die entsprechende Auftragszeit aus der operativen Kopie der Fertigungsauftragsliste gelesen und dem Materialflussbaustein Ressource_ASi beaufschlagt. Eine Aktualisierung der Monitoringgrössen ist in diesem Fall nicht notwendig, da keine Änderungen vorliegen.

Bem.: Nach Bearbeitungsende leitet der Materialflussbaustein Ressource_ASi den Fertigungsauftrag zum entsprechenden Nachfolger und löst damit den Steuerungsablauf erneut aus (siehe Abschnitt 5.2.4).

Element 28: $i := i - 1$

Die AS-Identifikationsnummer (Laufnummer) wird um einen Zähler reduziert.

Element 29: $i = 0$

Es wird geprüft, ob die Aufgaben der Auftragsfreigabe, Auftragsbearbeitung und Wahl des Fertigungsauftrags zur Bearbeitung durch sämtliche Arbeitssysteme durchgeführt wurden. Falls nein, werden diese Aufgaben für das aktuelle ASi ausgelöst. Andernfalls wird die Steuermarke zur Senke geleitet.

Element 30: *Ende*

Die Steuermarke wird vernichtet. Es werden keine weiteren Aktionen mehr ausgelöst, bis eine neue Steuermarke durch ein Ereignis (oder im Fall eines leeren Fertigungssystems durch TIM) generiert wird.

5.2.6. Der Programmblock Ausgangsgrössen

Der Block Ausgangsgrössen kann insofern als passiv bezeichnet werden, als dass er keine Aktivitäten in einem der drei anderen Programmblöcke auslöst (siehe Abbildung 68). Die Ausgangsgrössen setzen sich aus drei Elementen zusammen, die vom Benutzer während oder nach Abschluss eines Simulationsexperiments gelesen oder herauskopiert werden können:

- Datenerfassungsliste aller Fertigungsaufträge
- Datenerfassungsliste der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum
- Auswertungen der Fertigungsauftragsdaten (diverse)

Datenerfassungsliste aller Fertigungsaufträge

Wenn ein Fertigungsauftrag (bewegliche Einheit) zur Senke des Materialflussblocks gelangt, werden die für die Auswertung relevanten Daten des Fertigungsauftrags in die Datenerfassungsliste geschrieben. Pro Fertigungsauftrag werden der Sollendtermin, der Istend- und –starttermin sowie alle Isttermine auf Ebene Arbeitsvorgang (Start und Ende des Arbeitsvorgangs sowie der Bearbeitungsstart) erfasst.

Datenerfassungsliste der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum

Nach dem Ausfüllen der Datenerfassungsliste aller Fertigungsaufträge wird geprüft, ob der Sollendtermin des Fertigungsauftrags in den Auswertungszeitraum fällt. Falls dies der Fall ist erfolgt eine identische Datenerfassung des soeben beendeten Fertigungsauftrags in der Datenerfassungsliste der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum. Diese Liste enthält somit ausschliesslich Daten der auszuwertenden Fertigungsaufträge.

Auswertung der Fertigungsauftragsdaten

Nach Abschluss des Simulationsexperiments werden die Fertigungsauftragsdaten ausgewertet. Das bedeutet, dass anhand der Informationen in der Datenerfassungsliste der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum die vorgegebenen Zielgrössen berechnet werden. Es sind diese:

- Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge: Mittelwert (siehe Abschnitt 2.3.2, (2.14)) und Standardabweichung
- Termintreue: Relativer Wert (siehe Abschnitt 2.3.4, (2.18)) sowie die Summe der verfrühten resp. verspäteten Fertigstelltage
- Mittlerer Flussgrad (siehe Abschnitt 2.2.2, (2.7))

Die Auswertung lässt sich, wie in Abschnitt 5.2.1 bereits erwähnt, beliebig und fallspezifisch mit dem entsprechenden Programmieraufwand erweitern.

5.3. Die Anwendung in der Praxis

Das entwickelte Verfahren einer Steuerungs- und Regelungsstrategie (Abschnitt 4) wurde mittels Simulationssoftware (Abschnitt 5.1) in einem Simulationsmodell (Abschnitt 5.2) abgebildet. Mit dem Simulationsmodell soll die Effektivität des Verfahrens nachgewiesen werden. Dazu wird in den folgenden Abschnitten das Ergebnis des direkten Vergleichs mit zwei Industrieunternehmungen betreffend der Zielgrössen *Durchlaufzeit* und *Termintreue* vorgestellt. Mit der zweifachen Durchführung eines solchen Industrievergleichs wird die breite Validierung der Steuerungs- und Regelungsstrategie beabsichtigt. Aus diesem Grund sind die gewählten Firmen auch unterschiedlichen Branchen zuzuordnen (siehe Abschnitte 5.3.4 und 5.3.5).

5.3.1. Ablauf eines Industrievergleichs

Der grobe Ablauf der Anwendung in der Praxis wurde bereits in Abbildung 1 wiedergegeben. In einem ersten Schritt werden die in der Realität zurückgemeldeten Fertigungsauftragsdaten des Industrieunternehmens aus der Betriebsdatenerfassung gelesen. Aus diesen Istdaten werden sowohl die Durchlaufzeit als auch die Termintreue ermittelt. Ebenfalls aus den Istdaten wird in einem Zwischenschritt die Eingangsgrösse Fertigungsauftragsliste für das Simulationsmodell aufbereitet. Dazu wird die Fertigungsauftragsliste entsprechend Abbildung 69 mit realen Fertigungsauftragsdaten befüllt. Im anschliessenden zweiten Schritt werden diese Fertigungsaufträge durch das Simulationsmodell umgesetzt. Dabei werden die Ausgangsgrössen gemäss Abschnitt 5.2.6 erfasst. Diese Simulationswerte werden am Ende des Simulationsexperiments ausgewertet (analog der Ermittlung aus den Istdaten). Die resultierenden Zielgrössen Durchlaufzeit und Termintreue (Simulationsergebnisse) können direkt mit den in der Praxis erzielten Zielgrössen verglichen werden.

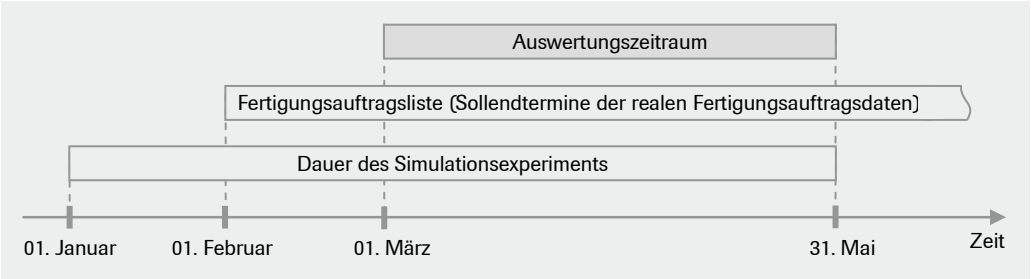


Abbildung 76: Relative Lage von Auswertungszeitraum, Sollendtermine der Fertigungsaufträge in der Fertigungsauftragsliste und Dauer des Simulationsexperiments

Die Abbildung 76 zeigt die relative Lage von Auswertungszeitraum, Fertigungsauftragsliste und Dauer des Simulationsexperiments zueinander. Der Auswertungszeitraum kann frei festgelegt werden (in Abbildung 76 umfasst er z.B. die Monate März, April und Mai). Mit den aus der Betriebsdatenerfassung gelesenen Fertigungsauftragsdaten werden darauf folgend die Werte der Zielgrössen aus der Praxis berechnet. Dies geschieht mittels der Daten jener Fertigungsaufträge, welche einen Sollendtermin (Planendtermin) im definierten Auswertungszeitraum haben.

Beim Aufbereiten der Eingangsgrösse Fertigungsauftragsliste für das Simulationsexperiment ist darauf zu achten, dass die Liste auch Fertigungsaufträge enthält, die sowohl einen Sollendtermin vor Beginn als auch nach Ende des Auswertungszeitraums haben. Beim Start des Simulationsexperiments ist das Simulationsmodell leer (d.h. es existieren keine freigegebenen Fertigungsaufträge). In der Einschwingphase bewirken diese Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin vor dem Auswertungszeitraum, dass zu Beginn des Auswertungszeitraums reale Verhältnisse vorliegen und entsprechend Fertigungsaufträge bereits in verschiedenen Stadien in Bearbeitung sind. In der Abbildung 76 werden Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin ab 1. Februar in die Fertigungsauftragsliste aufgenommen. Dies entspricht einer Zeitspanne von einem Monat vor dem Auswertungszeitraum. Diese Dauer ist nicht allgemeingültig, sondern hängt insbesondere auch von der mittleren Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge ab und sollte aus Erfahrung mindestens das Zweifache von dieser betragen. Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin nach dem Ende des Auswertungszeitraums bewirken, dass das Fertigungssystem gegen Ende des Simulationsexperiments nicht leer läuft. Dadurch wird eine unrealistische Abnahme der Systembelastung verhindert und die Ergebnisse aus dem Simulationsexperiment werden nicht verfälscht.

Die Dauer des Simulationsexperiments beginnt vor dem ersten Sollendtermin der Fertigungsaufträge (im Beispiel von Abbildung 76 am 1. Januar). Der Startzeitpunkt kann grundsätzlich beliebig früh festgelegt werden. Er sollte allerdings mindestens um die mittlere Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge vor dem ersten Sollendtermin der Fertigungsaufträge aus der Fertigungsauftragsliste liegen. Das Ende des Simulationsexperiments fällt mit dem Ende des Auswertungszeitraums zusammen.

5.3.2. Zulässigkeit eines Industrievergleichs

Ein Industrievergleich lässt sich grundsätzlich mit jedem Unternehmen durchführen, dass über diskrete (Fertigungs-) Prozesse verfügt (siehe die Abgrenzung der Arbeit, Abschnitt 1.4.2). *Damit man im Rahmen des Industrievergleichs zu zulässigen Aussagen kommt, ist es von ausserordentlicher Bedeutung, dass identische Rahmenbedingungen vorliegen.* Dies bezieht sich neben der Struktur der Fertigungsaufträge und dem Arbeitsinhalt (Auftragszeiten) insbesondere auf die Kapazitäten der Fertigung, mit welchen die Fertigungsaufträge umgesetzt werden. Dazu müssen sich im Simulationsmodell sowohl die Anzahl Arbeitsplätze als auch deren Arbeitszeiten (Schichtmodelle) mit den realen Begebenheiten des betrachteten Industrieunternehmens decken. Dies erreicht man mit einer entsprechenden Parametrierung der Eingangsgrössen (siehe Abschnitt 5.2.3).

5.3.3. Der Flussgrad

Die Definition des Flussgrads als Verhältnis der mittleren Durchlaufzeit zur mittleren Durchführungszeit wurde in (2.7) vorgenommen (siehe Abschnitt 2.2.2). Um den Flussgrad berechnen zu können ist neben der Rückmeldung des Bearbeitungsendes eines Arbeitsvorgangs auch die datentechnische Erfassung des Bearbeitungsstarts notwendig. Dies erfolgt bei den beiden Unternehmungen des Industrievergleichs nicht, womit eine Berechnung des Flussgrads nicht möglich

ist. Der Berechnungsaufwand nimmt zusätzlich zu, da sämtliche Pausen, Wochenenden, Feiertage, etc. explizit berücksichtigt werden müssen. Dies wiederum erfordert die entsprechenden Datenrückmeldungen.

Der absolute Wert der Durchlaufzeit ist für ein Fertigungsunternehmen eine zentrale Kenngrösse. Sie dient allerdings hauptsächlich zur relativen Bewertung von Massnahmen zur Durchlaufzeitreduktion und kann als alleiniger Wert nicht als Benchmark mit der Konkurrenz oder mit Schwestergesellschaften verwendet werden. Als Beispiel stelle man sich zwei Unternehmungen vor, welche über genau dieselben Fertigungsstrukturen und identische Auftragslast (Anzahl Fertigungsaufträge, Struktur der Fertigungsaufträge und Arbeitsinhalt) verfügen. Sie erzielen beide dieselbe, mittlere Fertigungsdurchlaufzeit. Dass die eine Unternehmung im Unterschied zur anderen im Zweischichtbetrieb operiert kommt in dieser Betrachtung nicht zum Ausdruck. Die operative Leistung sowie die Kostenstruktur (Personal und Betriebsmittel) dieser Firma sind deutlich schlechter. Entsprechend resultiert auch ein geringerer Deckungsbeitrag und somit ein reduzierter wirtschaftlicher Erfolg.

Zieht man zur Bewertung der operativen Leistung dieses vereinfachten Vergleichbeispiels den Flussgrad dazu, so spiegelt sich der Unterschied in dessen Wert direkt wieder. Durch die halb so langen Arbeitszeiten (Schichten) der einen Unternehmung resultiert eine doppelt so grosse Durchführungszeit. Entsprechend halbiert sich nach (2.7) der Wert des Flussgrads. Im Unterschied zur Durchlaufzeit ist der alleinige Wert des Flussgrads eine aussagekräftige Grösse.

Aus diesem Grund werden im Rahmen der zwei Industrievergleiche *keine kapazitiven Steuerungsaktivitäten* ausgelöst. Damit wird sichergestellt, dass der Vergleich der mit dem entwickelten Verfahren erzielten Durchlaufzeiten mit den in der Praxis erreichten Durchlaufzeiten zulässig ist.

Obwohl die Ermittlung des Flussgrades bei den beiden Industriepartnern nicht möglich ist wird im Rahmen des Simulationsexperiments der Flussgrad berechnet und als ergänzendes Ergebnis aufgeführt. Die Kenngrösse Flussgrad kann somit nicht verglichen werden. Sie kann jedoch als zusätzliches Beurteilungskriterium der Steuerungs- und Regelungsstrategie herangezogen werden.

5.3.4. Der erste Industrievergleich (Firma A)

Fertigungscharakteristik der Firma A

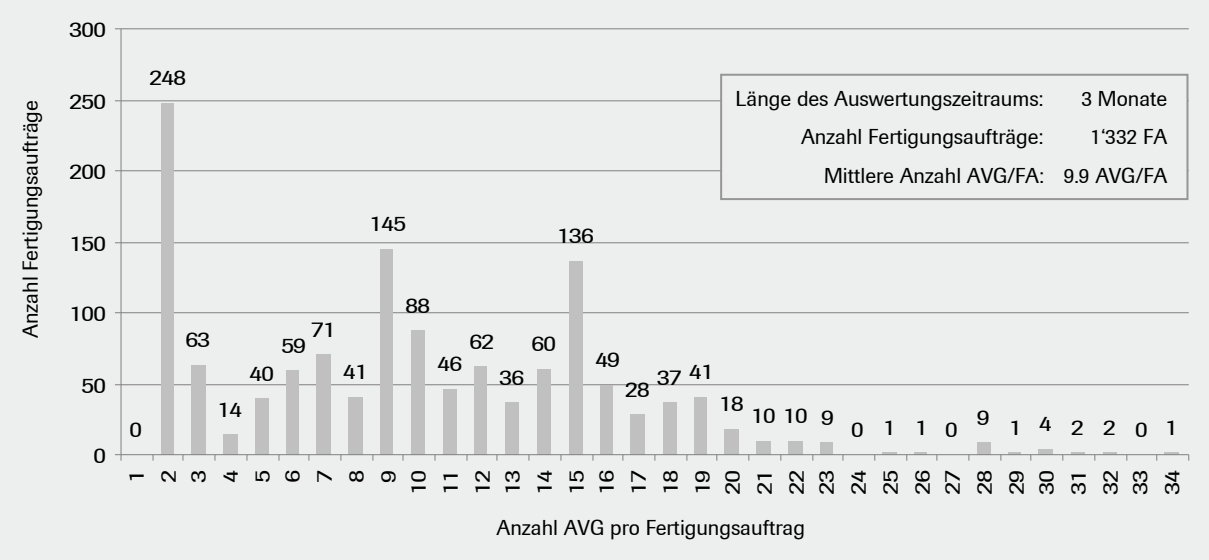


Abbildung 77: Übersicht über die Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag (Unternehmung A)

Die Firma A, mit welcher der eine Industrievergleich durchgeführt wird, ist ein Elektronikproduzent für industrielle Anwendungen. Das Unternehmen versteht sich als Dienstleistungsunternehmen und industrialisiert und fertigt für industrielle und medizinaltechnische Auftraggeber sowohl Produkte als auch Systeme. Der Industrievergleich bezieht sich auf den Fertigungsstandort in der Schweiz. Dieser umfasst 70 Arbeitssysteme, teilweise mit mehreren Arbeitsplätzen, und einem externen Dienstleister.

Der Auswertungszeitraum dieses Industrievergleichs erstreckt sich über drei Monate. Es existieren insgesamt 1'332 Fertigungsaufträge, welche über einen Sollendtermin innerhalb des festgelegten Auswertungszeitraums verfügen. Die Variabilität der Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag kommt in Abbildung 77 zum Ausdruck, in welcher die Anzahl Arbeitsvorgänge der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum dargestellt sind. Bei der Auswertung wurden nur Arbeitsvorgänge mit „echtem“ Arbeitsinhalt berücksichtigt. Sogenannte „Meilenstein“-Arbeitsvorgänge, wie sie gewisse Softwareanbieter verwenden, die einen Arbeitsinhalt von Null ausweisen, wurden ausgeblendet. Im Durchschnitt besteht ein Fertigungsauftrag aus 9.9 Arbeitsvorgängen.

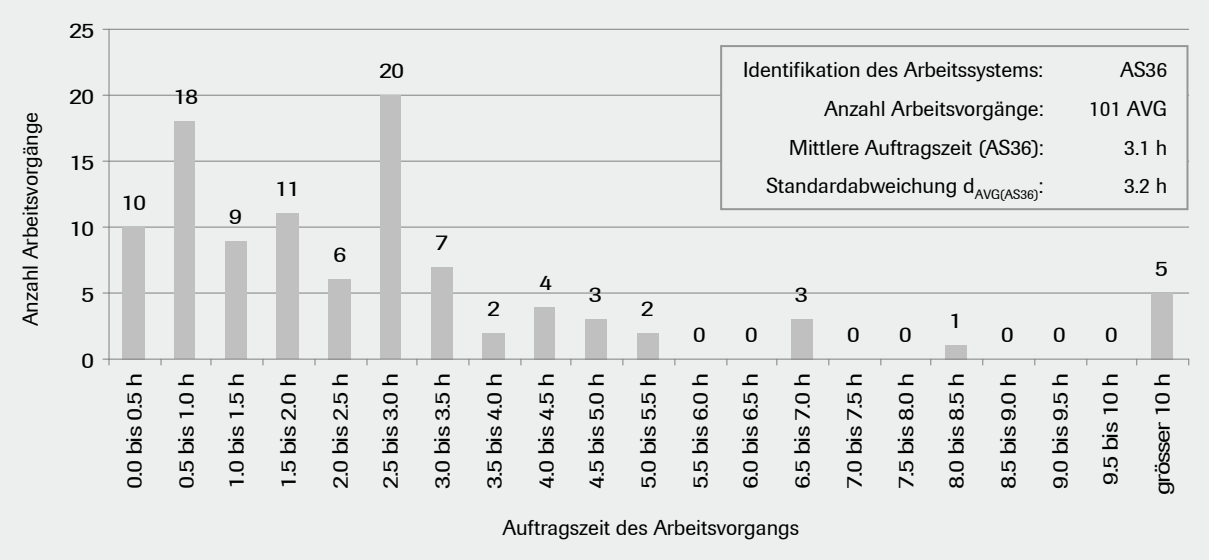


Abbildung 78: Streuung der Auftragszeiten an einem Arbeitssystem (AS36) der Unternehmung A

Die Streuung der Auftragszeit pro Arbeitssystem wird in Abbildung 78 anhand eines beliebigen Arbeitssystems illustriert. Bei dem zufällig gewählten Arbeitssystem AS36 handelt es sich um einen Prüfarbeitsplatz während des Fertigungsablaufs (keine Endprüfung). Das Arbeitssystem wird während dem Auswertungszeitraum von 101 Fertigungsaufträgen durchlaufen, was knapp 8 % der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum entspricht. In der Abbildung 78 sind auf der Abszisse die Auftragszeiten in einem Halbstundenraster aufgetragen. Auf der Ordinate werden die Anzahl Arbeitsvorgänge gezählt, deren Auftragszeit auf dem Arbeitssystem 36 in die entsprechenden Werteklassen des Halbstundenrasters fallen. Die mittlere Auftragszeit $\overline{d_{AVG\,AS36}}$ beträgt 3.1 h und die Standardabweichung 3.2 h. Bei einer derart intensiven Streuung der Auftragszeiten drängt sich die Überlegung einer Glättung der Auftragszeiten auf. Eine solche Harmonisierung durch beispielsweise Losgrössenoptimierung ist nicht Bestandteil des Industrievergleichs (siehe Abschnitt 6.2.3). Im Gegenteil wird beabsichtigt, eine identische Aufgabenstellung in Form der gleichen Auftragslast zu lösen. Dadurch werden Ergebnisse erzielt, die sich direkt miteinander vergleichen lassen.

Vergleich der Durchlaufzeiten

Gemäss dem Ablauf eines Industrievergleichs (siehe Abschnitt 5.3.1) wird zuerst die Durchlaufzeit der Firma A ausgewertet. Dazu werden die Rückmeldedaten der 1'332 Fertigungsaufträge herangezogen, die einen Sollendtermin innerhalb des Auswertungszeitraums haben. Das Ergebnis ist in Abbildung 79 dargestellt (hellgraue Säulen). Ein Drittel aller Fertigungsaufträge weist eine Durchlaufzeit aus, die kleiner gleich 4 BKT ist. Das deckt sich mit der Erkenntnis gemäss Abbildung 77, nach welcher ein Grossteil der Fertigungsaufträge über nur wenige Arbeitsvorgänge verfügt. Knapp 10 % der Fertigungsaufträge verweilten für mehr als 20 BKT im Fertigungsumlauf. Die Erklärung dazu liegt unter Anderem beim externen Dienstleister, der eine feste Durchlaufzeit von 15 BKT benötigt. Alle FA, die für einen AVG extern bearbeitet wurden, weisen also bereits eine Mindestdurchlaufzeit von 15 BKT aus, welche durch zusätzliche, interne AVG verlängert werden kann. Weitere Gründe für die langen Durchlaufzeiten können technische Abklärungen mit dem Kunden, fehlendes Rohmaterial, etc. sein.

Die mittlere Durchlaufzeit während des Auswertungszeitraums beträgt 9.7 BKT (siehe Abbildung 79). Die Standardabweichung ist mit einem Wert von 12.8 BKT gross (knapp 25 % grösser als der Mittelwert). Die Begründung dazu liegt unter Anderem in der Variabilität der Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag (siehe Abbildung 77) und der tendenziell starken Streuung der Auftragszeiten pro Arbeitvorgang (am Beispiel von AS36 in Abbildung 78).

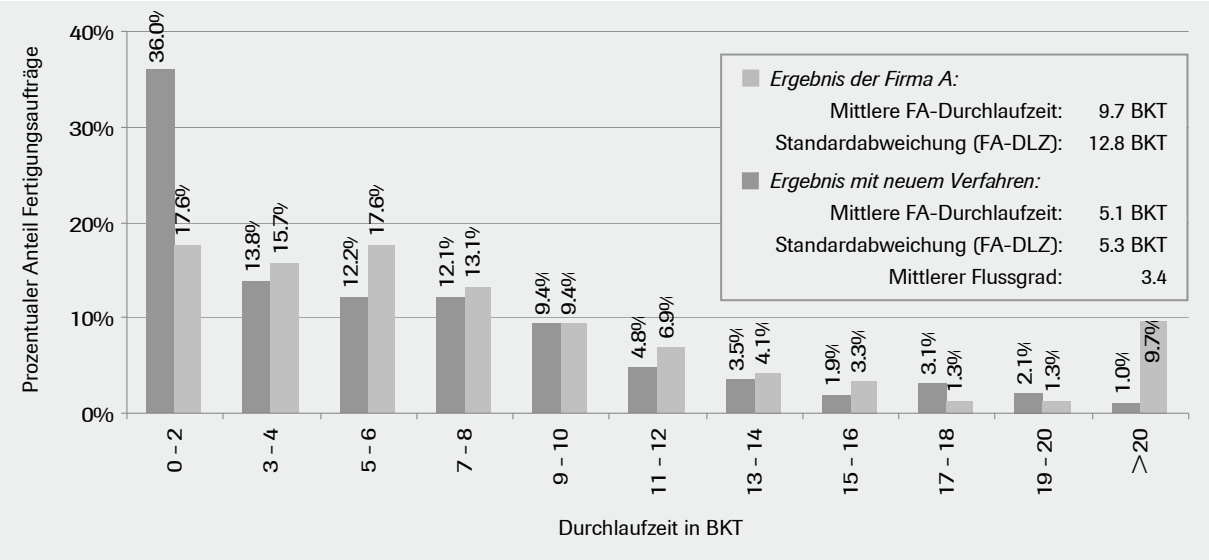


Abbildung 79: Gegenüberstellung des Durchlaufzeitergebnisses der Firma A mit dem Durchlaufzeitergebnis, das mit dem neuen Steuerungs- und Regelungsverfahren erzielt wurde

In einem Simulationsexperiment werden nun dieselben Fertigungsaufträge umgesetzt. Dabei werden die Abläufe in der (Simulations-) Fertigung nach dem in Abschnitt 4 vorgestellten Steuerungs- und Regelungsverfahren festgelegt. Nach Abschluss der Durchführung des Simulationsexperiments kann das Durchlaufzeitergebnis berechnet werden, das durch Anwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie erzielt wurde. Es ist ebenfalls in Abbildung 79 dargestellt (dunkelgraue Säulen).

Die offensichtlichsten Unterschiede der beiden Ergebnisse liegen bei den beiden extremsten Wertegruppen (Durchlaufzeiten kleiner 2 BKT und Durchlaufzeiten grösser 20 BKT). Das Säulenpaar ganz links in Abbildung 79 zeigt den prozentualen Anteil an Fertigungsaufträgen, welche eine Durchlaufzeit von weniger als 2 BKT ausweisen. Mit dem Steuerungs- und Regelungsverfahren gemäss Abschnitt 4 ist die Anzahl dieser Fertigungsaufträge um absolut knapp 20 % gestiegen.

Bezogen auf die Fertigungsaufträge, welche nach dem Steuerungsverfahren der Unternehmung A eine Durchlaufzeit kleiner 2 BKT hatten, entspricht die Zunahme mehr als 100 %. Beim Säulenpaar ganz rechts in Abbildung 79, welches Fertigungsaufträge mit einer Durchlaufzeit von über 20 BKT darstellt, hat sich der Anteil Fertigungsaufträge innerhalb dieser Werteklasse auf ein Zehntel reduziert (von 9.7 % auf 1.0 %). Gänzlich eliminieren lässt sich die Klasse deswegen nicht, weil die Durchlaufzeit des externen Dienstleisters wie bereits erwähnt 15 BKT beträgt. Diese Dauer verlängert sich durch allfällige Wartezeiten auf den Shuttletransport und interne Arbeitsvorgänge.

Mit dem Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie konnte die mittlere Durchlaufzeit derselben 1'332 Fertigungsaufträge auf 5.1 BKT verkürzt werden. Das entspricht, ausgehend vom durch die Firma A erzielten Ergebnis, einem Durchlaufzeitpotential von knapp 48 %. Die Standardabweichung der Durchlaufzeit hat sich bei Verwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie in Bezug auf den Mittelwert um beinahe 25 % reduziert. Der resultierende Wert ist allerdings nach wie vor grösser als der Mittelwert. Die Begründung dafür ist die dieselbe wie in der Praxis: die fokussierte Fertigungscharakteristik des Einsatzgebiets (gemäss Abschnitt 1.4.3). Sie ist geprägt durch eine variable Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag sowie schwankende Arbeitsinhalte pro Arbeitsvorgang. Der durch Anwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie erzielte, mittlere Flussgrad liegt mit einem Wert von 3.4 gemäss (2.9) im definierten Zielwertebereich. Der ausgewiesene Wert sagt aus, dass die Fertigungsaufträge im Mittel 3.4-mal so lange für den Fertigungsdurchlauf benötigten wie die effektive Bearbeitungsdauer (Auftragszeit) beträgt.

Vergleich der Terminabweichungen/Termintreue

Nach der Betrachtung der Durchlaufzeit (und des mit dem Steuerungs- und Regelungsverfahren erzielten Flussgrads) werden nun die Terminabweichung sowie die Termintreue betrachtet. Wiederum wird dazu erst das in der Industrie erzielte Ergebnis untersucht. Dazu werden die Rückmeldedaten der 1'332 Fertigungsaufträge der Firma A aus dem Auswertungszeitraum ausgewertet. Mit den erfassten Soll- und Istendterminen der Fertigungsaufträge kann die resultierende Terminabweichung pro Fertigungsauftrag Δt_{FAAb} gemäss (2.17) berechnet werden.

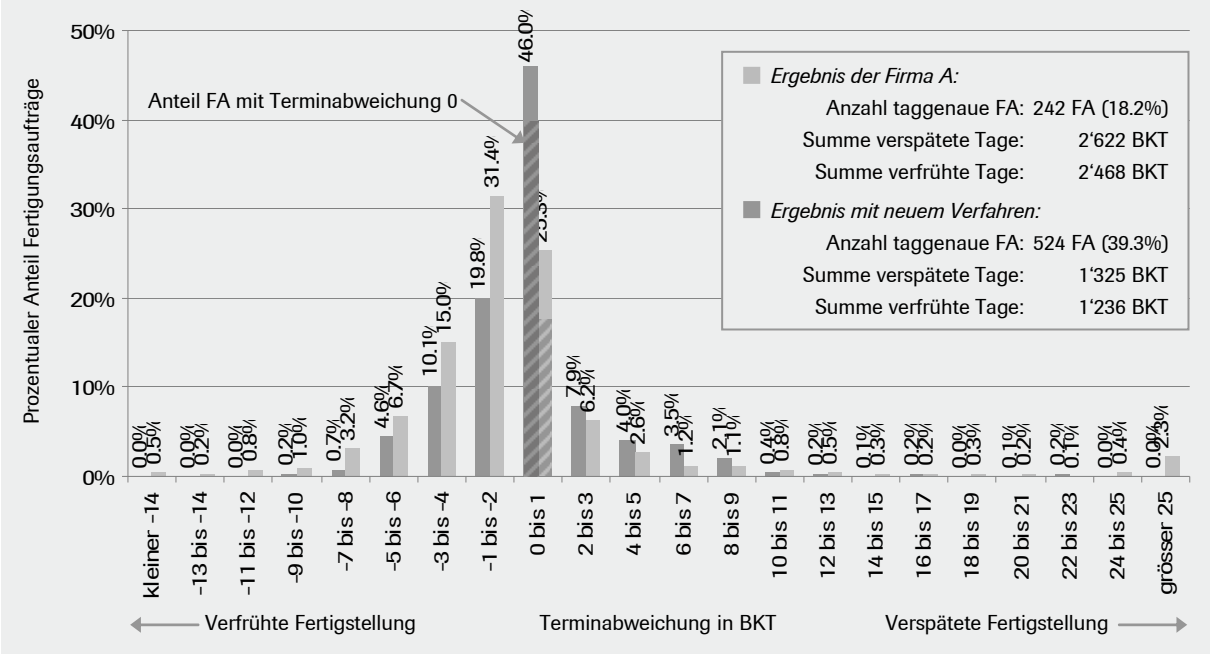


Abbildung 80: Gegenüberstellung des Terminabweichungsergebnisses der Firma A mit dem Terminabweichungsergebnis, das mit dem neuen Steuerungs- und Regelungsverfahren erzielt wurde

Das Ergebnis aller Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum ist in Abbildung 80 zusammengefasst. Ein negativer Terminabweichungswert bedeutet gemäss Definition, dass der Fertigungsauftrag früher als geplant fertig gestellt wurde. Ein positiver Terminabweichungswert dagegen bedeutet, dass die Fertigstellung des Fertigungsauftrags gegenüber dem Sollendtermin verspätet stattgefunden hat.

Abbildung 80 zeigt, dass das terminliche Ergebnis der Firma A (hellgraue Säulen) gut ist. Der Grossteil der Fertigungsaufträge liegt in geringen Abweichungsfenstern (über 80 % der Fertigungsaufträge weisen eine Terminabweichung von weniger als –4 BKT resp. +5 BKT aus). Über die Hälfte aller Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum wird zwischen -1 und -6 BKT zu früh fertig gestellt (das betrifft 53.1 % aller FA). Etwas mehr als ein Drittel (34.1 %) der Fertigungsaufträge wird gegenüber dem Sollendtermin mit einer Verspätung beendet, die weniger als 5 BKT beträgt. Die Abbildung 80 zeigt, dass im Auswertungszeitraum insgesamt mehr Fertigungsaufträge (58.8 %) zu früh abgeschlossen wurden als zu spät. Der absolute Wert der Terminabweichung im Falle einer verfrühten Fertigstellung ist im Durchschnitt kleiner als bei einer verspäteten Fertigstellung. Diese Erkenntnis spiegelt sich in der Summe der verfrühten Tage wieder, die trotz grösserem Anteil Fertigungsaufträge kleiner ist als die Summe der verspäteten Tage (siehe den Kasten in Abbildung 80). Diese zwei Werte entsprechen jeweils der absoluten Summe aller Terminabweichungen mit demselben Vorzeichen der Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum.

Für die Ermittlung der Termintreue nach (2.18) muss sowohl eine Unter- als auch Obergrenze der zulässigen Abgangsterminabweichung festgelegt werden (Δt_{FAAbUG} und Δt_{FAAbOG}). Für diesen Vergleich wurde sowohl für die Untergrenze als auch für die Obergrenze der zulässigen Abgangsterminabweichung der Wert 0 BKT gewählt. Das bedeutet, dass lediglich Fertigungsaufträge, die taggenau fertiggestellt werden, als termintreu betrachtet werden. Im Fall der Firma A handelt es sich um 242 Fertigungsaufträge der insgesamt 1'332 FA, welche taggenau (dem Sollendtermin entsprechend) fertig gestellt wurden. Die Termintreue beträgt demzufolge 18.2 %, also knapp ein Fünftel der Gesamtmenge. Dieser Anteil ist in Abbildung 80 als schraffierte Säule dargestellt.

Aus den Ergebnissen des Simulationsexperiments können ebenfalls die Terminabweichungen der Fertigungsaufträge ausgewertet werden. Das Ergebnis ist ebenfalls in Abbildung 80 (dunkelgraue Säulen) dargestellt.

Der Anteil der Fertigungsaufträge, die eine Terminabweichung von weniger als -4 BKT resp. +5 BKT ausweisen, konnte mit dem Einsatz des neuen Verfahrens von 80.5 % (Summe der entsprechenden hellgrauen Säulen in Abbildung 80) um ca. 10 % auf knapp 88 % gesteigert werden (Summe der entsprechenden dunkelgrauen Säulen in Abbildung 80). Der Effekt dieser Verbesserung ist in der Summe der verspäteten und verfrühten Tage sichtbar. Beide Werte haben sich durch den Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie wesentlich reduziert: die Summe der verspäteten Tage hat sich um über 50 % auf einen Wert von 1'308 BKT reduziert und jener der verfrühten Tage auf 1'220 BKT (das entspricht ebenfalls einer Reduktion von gut 50 %).

Im Unterschied zum Ergebnis durch die Firma A hat sich der Anteil der Fertigungsaufträge mit einer verfrühten Fertigstellung, die weniger als -6 BKT beträgt, auf unter 35 % reduziert. Dafür stieg der Anteil jener Fertigungsaufträge, die taggenau oder mit einer Verspätung von maximal +5 BKT beendet wurden, auf deutlich mehr als die Hälfte aller Fertigungsaufträge (57.9 %) an.

In der Abbildung 80 ist ausserdem erkennbar, dass durch Anwendung des neuen Verfahrens sowohl die minimale als auch die maximale Terminabweichung reduziert werden konnte. Mit der Steuerungs- und Regelungsstrategie beträgt die maximale Verfrühung -10 BKT während die Firma A auch Fertigungsaufträge (ein Anteil von 0.5 %) mit mehr als -14 BKT Verfrühung beendete. Die-

selbe Beobachtung gilt für die Verspätung: mit dem neuen Verfahren beträgt die maximale Verspätung 23 BKT, welche einen Anteil von 0.2 % der Fertigungsaufträge betrifft, während die Firma A Terminabweichungen von mehr als 25 BKT Verspätung bei 2.3 % aller Fertigungsaufträge ausweist.

Die Termintreue, ebenfalls mit einer Unter- und Obergrenze der zulässigen Abgangsterminabweichung von 0 BKT berechnet, beträgt bei der Verwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie 39.3 %. Das heisst, dass die Anzahl taggenau fertig gestellter Fertigungsaufträge gegenüber der Firma A mehr als verdoppelt werden konnte. In Abschnitt 2.3.4 wurde aufgeführt, dass die Termintreue als logistische Prozesssicherheit interpretiert werden kann [WIE03]. Im Rahmen dieses Industrievergleichs wird die härteste Definition der Termintreue angewendet (der Wert von Δt_{FAAbUG} und Δt_{FAAbOG} beträgt jeweils 0 BKT).

Vergleich der Auslastung

Wie bereits aufgeführt wird die Auslastung der einzelnen Arbeitssysteme im Rahmen des Industrievergleichs nicht explizit ausgewertet. Dafür gibt es zwei Gründe:

- Die Auslastung eines Arbeitssystems wird einerseits aus „Sicht der Steuerung“ als ein Ergebnis betrachtet, welches auf die Summe der Auftragszeiten pro Periode und betrachtetes Arbeitssystem zurückgeht. Diese Summe ist durch die Fertigungsauftragsliste vorgegeben. Die Fertigungsauftragsliste wird durch eine übergeordnete Stelle erstellt und kann durch die Fertigungssteuerung nicht beeinflusst werden.

  ➔ die Auslastung wird als Ergebnis- und nicht als Zielgrösse aufgefasst
- Andererseits ist der Aufwand einer solchen Auswertung umfangreich (Berücksichtigung von Wochenenden, Feiertagen, Pausen, etc.). Zusätzlich ist es zwingend, dass sowohl Start- und Endzeitpunkt jeder Arbeitsvorgangsbearbeitung erfasst werden. Falls die Erfassung dieser Zeitpunkte mit Fehlern behaftet ist, könnten falsche Schlussfolgerungen gezogen werden. Werden die Arbeitsvorgangszeitpunkte nicht erfasst, ist die Berechnung der Auslastung auf Stufe Arbeitssystem erst gar nicht möglich.

  ➔ Vergleichsmöglichkeiten nicht gegeben oder Risiko von falschen Interpretationen

In Abschnitt 5.3.2 wurden im Zusammenhang mit der Zulässigkeit des Industrievegleichs identische Rahmenbedingungen gefordert. Dies bezieht sich im Wesentlichen auf Struktur und Umfang der Fertigungsauftragsliste und auf die zur Verfügung stehenden Kapazitäten zur Abarbeitung der Fertigungsauftragsliste. Ebenso gehört eine vergleichbare Leistung durch das Fertigungssystem dazu (und somit auch Auslastung des Fertigungssystems). Aus diesem Grund wird anstelle der Auslastung der einzelnen Arbeitssysteme die Auslastung auf Stufe Fertigungssystem betrachtet. Die geführten Diskussionen betreffend der Zielgrössen Durchlaufzeit und Terminabweichung/Termintreue sowie die Quantifizierung der ausgewiesenen Potentiale gegenüber den realen Ergebnissen der Firma A haben nur in dem Fall Gültigkeit, in welchem der Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie dieselbe Leistung (oder Auslastung des Fertigungssystems) erbringt. Der Einfachheit halber wird diese Betrachtung in der Einheit „Anzahl Fertigungsaufträge“ durchgeführt.

Die Abbildung 81 enthält eine Auflistung verschiedener Fertigungsauftragsklassen. Die Klassen ergeben sich aufgrund der Konstellation der Soll- und/oder Istendtermine der Fertigungsaufträge hinsichtlich ihrer Lage zum Auswertungszeitraum. Als Auswertungszeitraum gelten dieselben drei Monate, über welche sich der Industrievergleich erstreckt. Auf der rechten Seite der Abbildung 81 sind die Anzahl Fertigungsaufträge pro Klasse aufgeführt. Dabei wird, analog zum durchgeführten

Industrievergleich, die reale Ausgangssituation der Firma A und der Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie im Simulationsmodell unterschieden.

	Auslastungsübersicht in Anzahl Fertigungsaufträge (Betrachtungsebene: Fertigungssystem)	Firma A	Simulation
1.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum	1‘332	1‘332
2.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *vor* dem Auswertungszeitraum	- 55	- 40
3.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *nach* dem Auswertungszeitraum	- 45	- 17
4.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	= 1‘232	= 1‘275
5.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *vor* dem Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	+ 11	+ 7
6.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *nach* dem Auswertungszeitraum u. mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	+ 47	+ 25
7.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	= 1‘290	= 1‘307

Abbildung 81: Vergleich der Leistung des Fertigungssystems des ersten Industrievergleichs (mit Firma A) anhand der Anzahl Fertigungsaufträge mit Istendterminen im Auswertungszeitraum

In der ersten Zeile in Abbildung 81 sind die Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin während dem Auswertungszeitraum aufgeführt. Es handelt sich gemäss den obigen Ausführungen um 1'332 Fertigungsaufträge, sowohl in der Ausgangslage der Firma A als auch für das Simulationsexperiment. Von dieser Anzahl werden jene Fertigungsaufträge subtrahiert, welche den Istendtermin entweder vor oder nach dem Auswertungszeitraum haben (Abbildung 81, 2. und 3. Zeile). Es resultieren in der vierten Zeile die Anzahl Fertigungsaufträge, welche sowohl den Soll- als auch den Istendtermin im Auswertungszeitraum haben. Während dem Auswertungszeitraum wurden Fertigungsaufträge beendet, die über einen Sollendtermin entweder vor oder nach dem Auswertungszeitraum verfügen (Abbildung 81, 5. und 6. Zeile). Addiert man diese Anzahl Fertigungsaufträge zum Zwischenergebnis in der vierten Zeile so resultiert die Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum (Abbildung 81, 7. Zeile).

Die Summe der Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin während dem Auswertungszeitraum ist im Simulationsexperiment leicht (um 1.3 %) grösser als die Summe aus der Ausgangssituation der Firma A (Abbildung 81, 7. Zeile). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die im Simulationsexperiment erbrachte Leistung mindestens so hoch sein muss wie in der industriellen Realität der Firma A. Durch die Definition identischer Kapazitäten trifft dieselbe Aussage auch auf die Auslastung zu.

Vergleich der Bestände

Der Bestand, nach Abschnitt 2.3.1 als offener Arbeitsvorrat aller Arbeitssysteme des Fertigungsbereichs definiert, wird ebenfalls nicht gemessen. In Anlehnung an Little’s Gesetz (siehe Abschnitt 2.4.1) und an die Trichterformel (siehe Abschnitt 2.4.3) gilt, dass sich der mittlere Bestand in einer Fertigung proportional zur mittleren Durchlaufzeit verhält. Unter der Voraussetzung der Richtigkeit dieser Theorie kann davon ausgegangen werden, dass sich das mittlere Bestandsniveau proportional zur mittleren Durchlaufzeit gesenkt hat (um ca. - 48 %).

Berücksichtigung technischer Störungen

Bei der Durchführung des Industrievergleichs wurden zur Vereinfachung keine technischen Störungen berücksichtigt. Im Rahmen der Validierung ist es unverzichtbar, mittels einer Sensitivitätsanalyse den Einfluss der technischen Störungen auf die erzielten Ergebnisse zu untersuchen.

Stör-muster	Dauer (MTTR)	Einheit (MTTR)	Häufigkeit (MTTR)	Bezugszeitraum der Häufigkeit (MTTR)
A	0.25	h	1	Woche
B	0.50	h	1	Monat
C	0.17	h	1	Woche
D	1.00	h	1	Schicht (8 h)
E	1.00	h	1	Woche
F	0.75	h	1	Woche
G	0.50	h	1	Schicht (8 h)
H	0.25	h	2	Woche
I	4.00	h	1	Monat

Abbildung 82: Störmusterset, mit welchem sich die technischen Störungen der Firma A abbilden lassen[5]

Dazu wird das Set von Störmuster in Abbildung 82 verwendet, welches durch die Firma A erstellt wurde. Jedem Arbeitssystem wird ein Störmuster zugewiesen und im Simulationsmodell die entsprechende Parametrierung der Arbeitssysteme vorgenommen. Die Störmuster aus Abbildung 82 können dabei mehrfach verwendet werden. Das wiederholte Simulationsexperiment erfolgt somit inklusive Abbildung realer, technischer Störungen. Das Ergebnis dieses Simulationsexperiments wird im Folgenden mit dem Ergebnis aus der Realität sowie mit jenem Ergebnis verglichen, das im ersten Simulationsexperiment (ohne Berücksichtigung technischer Störungen) erreicht wurde.

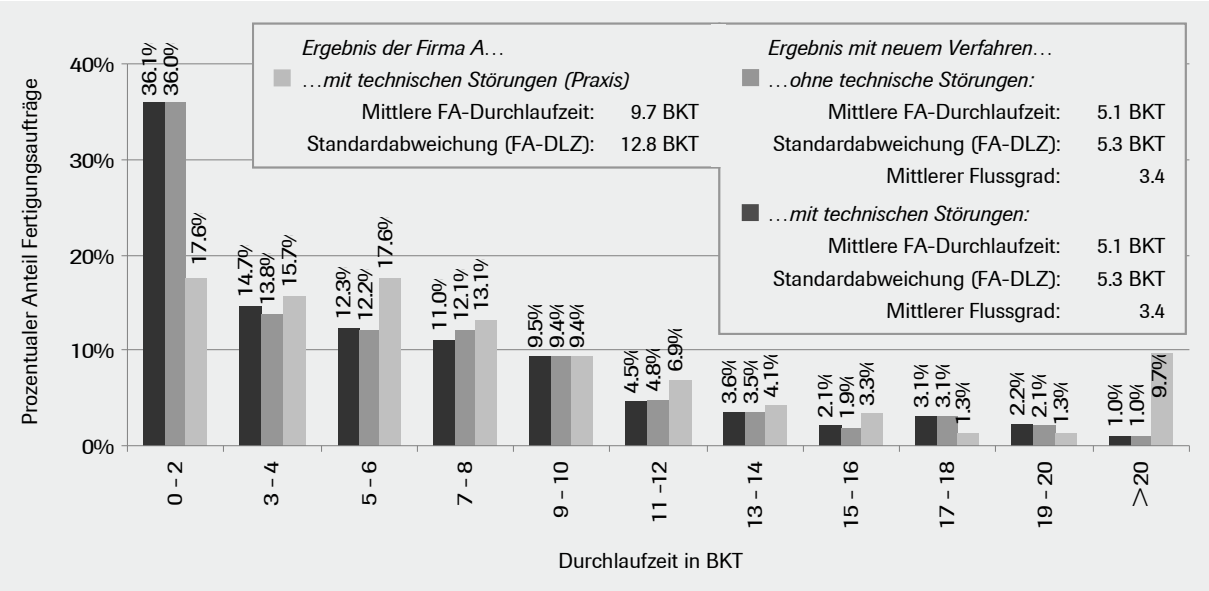


Abbildung 83: Gegenüberstellung des Durchlaufzeitergebnisses der Firma A mit dem Durchlaufzeitergebnis aus dem Simulationsexperiment (einmal ohne, einmal mit technischen Störungen)

[5] MTTR = Mean Time To Repair (engl.: durchschnittliche Instandsetzungsdauer)

Das Durchlaufzeitergebnis des Simulationsexperiments mit Berücksichtigung der technischen Störungen ist in Abbildung 83 zusammengefasst (schwarze Säulen). Das Ergebnis aus dem Simulationsexperiment ohne technische Störungen ist mit dunkelgrauen Säulen und jenes mit den realen Durchlaufzeiten der Firma A mit hellgrauen Säulen dargestellt (analog Abbildung 79).

Es fällt auf, dass die beiden mit dem Simulationsmodell erzielten Ergebnisse beinahe identisch sind. Diese Feststellung gilt insbesondere für den ausgewiesenen Mittelwert, die Standardabweichung sowie den Flussgrad. Die einzelnen Werteklassen unterscheiden sich maximal um wenige Zehntel Prozentpunkte. Ausnahme bilden die beiden Klassen mit Durchlaufzeitwerten von 3 bis 4 resp. 7 bis 8 BKT, in welchen sich die Anzahl Fertigungsaufträge um jeweils rund 1 % unterscheiden. Aufgrund dieser Feststellungen kann angenommen werden, dass das Steuerungs- und Regelungsverfahren auf technische Störungen (wie sie in der Realität auftreten) robust reagiert.

Das Terminabweichungs- und Termintreueergebnis des Simulationsexperiments mit Berücksichtigung technischer Störungen ist in Abbildung 84 zusammengefasst (schwarze Säulen). Die dunkel- und hellgrauen Säulen stellen wiederum die Ergebnisse aus dem Simulationsexperiment ohne technische Störungen sowie das in der Realität durch die Firma A erzielte Ergebnis dar (analog Abbildung 80). Wiederum sind die Differenzen der beiden Simulationsergebnisse minimal.

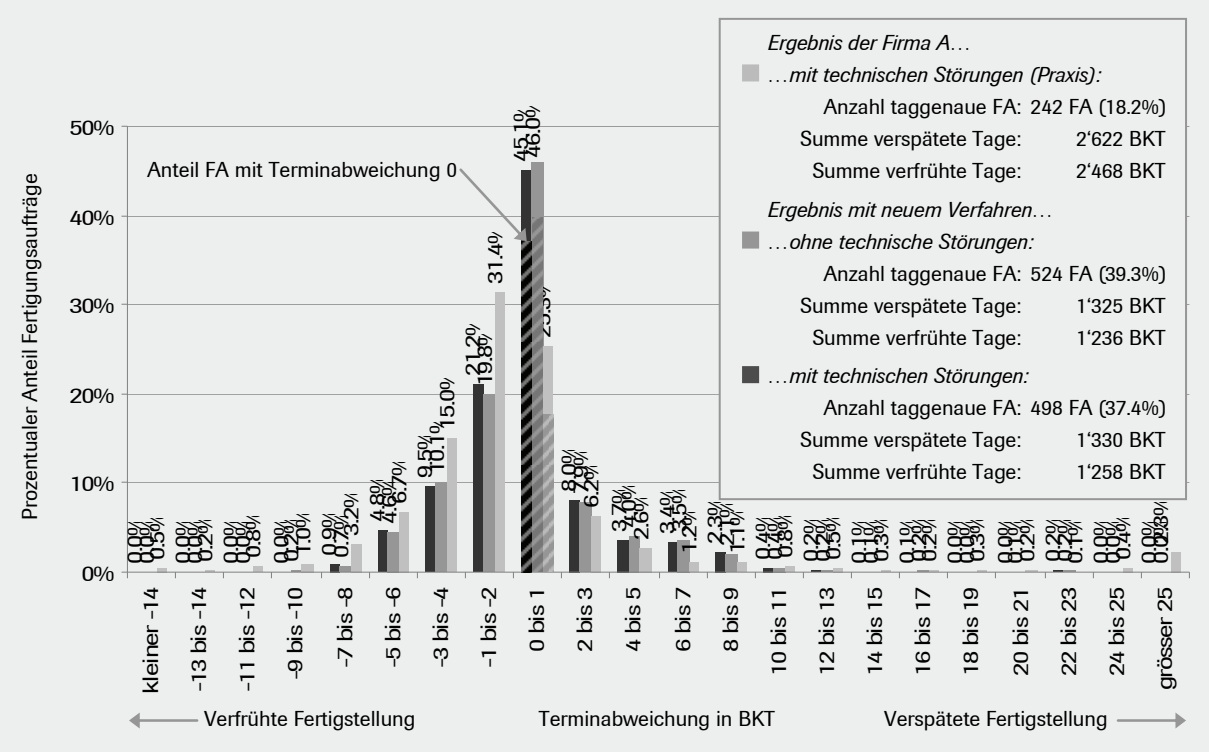


Abbildung 84: Gegenüberstellung der Terminabweichungen und Termintreue der Firma A mit den Ergebnissen aus dem Simulationsexperiment (einmal ohne, einmal mit technischen Störungen

Die Termintreue (+/- 0 BKT) hat um knapp 2 % abgenommen. Das bedeutet, dass 26 Fertigungsaufträge weniger taggenau fertiggestellt wurden. Die Summe der verspäteten Tage hat um 5, jene der verfrühten Tage um 22 BKT zugenommen. Das bedeutet, dass die Kompensation der Termintreue schwergewichtig durch eine verfrühte Fertigstellungen erfolgte. Diese Erkenntnis wiederspiegelt sich bei den schwarzen Säulen in Abbildung 84, wo im Unterschied zum Simulationslauf ohne technische Störungen primär jene mit einer Verfrühung zwischen -8 und -5 sowie -2 und -1 BKT zugenommen haben. Infolge der grundsätzlich marginalen Abweichungen lässt sich auch in Bezug auf die Terminabweichung sowie die Termintreue feststellen, dass sich das neue Steuerungs- und Regelungsverfahren robust verhält.

Auch für das Simulationsexperiment mit technischen Störungen wird der Auslastungsnachweis durchgeführt. Dazu wird analog zum ersten Simulationsexperiment ohne technische Störungen die Leistung des Fertigungssystems in der Einheit Fertigungsaufträge gemessen. Die Abbildung 81, die den Leistungs-/Auslastungsnachweis für das Simulationsexperiment ohne technische Störungen beinhaltet, wird mit einer Spalte „Sim mit“ ergänzt (siehe Abbildung 85). Diese zusätzliche Spalte enthält die Anzahl Fertigungsaufträge pro Klasse für das Simulationsexperiment mit Berücksichtigung der technischen Störungen.

	Auslastungsübersicht in Anzahl Fertigungsaufträge (Betrachtungsebene: Fertigungssystem)	Firma A	Sim ohne	Sim mit
1.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum	1‘332	1‘332	1‘332
2.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *vor* dem Auswertungszeitraum	- 55	- 40	- 40
3.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *nach* dem Auswertungszeitraum	- 45	- 17	- 23
4.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *im* Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	= 1‘232	= 1‘275	= 1‘269
5.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *vor* dem Auswertungszeitraum und mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	+ 11	+ 7	+ 7
6.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin *nach* dem Auswertungszeitraum u. mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	+ 47	+ 25	+ 22
7.	Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin *im* Auswertungszeitraum	= 1‘290	= 1‘307	= 1‘298

Abbildung 85: Leistungsvergleich des ersten Industrievergleichs in der Einheit FA mit Istendterminen im Auswertungszeitraum (ergänzt mit dem Simulationsexperiment mit technischen Störungen)

Die Summe der Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum ist auch im Simulationsexperiment mit Berücksichtigung der technischen Störungen leicht (um 0.6 % oder 8 Fertigungsaufträge) grösser als in der Realität (Abbildung 85, 7. Zeile). Daraus lässt sich ableiten, dass die im Simulationsexperiment erbrachte Leistung mindestens so hoch sein muss wie in der industriellen Realität der Firma A. Durch die gegebene Voraussetzung identischer Kapazitäten trifft dieselbe Aussage auch auf die Auslastung zu.

5.3.5. Der zweite Industrievergleich (Firma B)

Fertigungscharakteristik der Firma B

Der zweite Industrievergleich wird mit der Firma B durchgeführt. Es handelt sich um einen High-Tech Anbieter, dessen Basis der Unternehmensentwicklung im Engineering und in der Herstellung von Linear- und Antriebskomponenten liegt. Diese finden Anwendung in Werkzeugmaschinen, Sondermaschinen sowie in der Handhabung und sind in einer Vielzahl von Qualitäten und Ausführungen erhältlich. Durch die Integration der Steuerungstechnik werden neben den Komponenten und Modulen auch Portalroboter sowie komplette auf den Kunden zugeschnittene Systemlösungen entwickelt. Der zweite Industrievergleich wird im Fertigungsbereich dieses Anbieters durchgeführt. Dieser besteht aus 72 Arbeitssystemen und rund 30 externen Dienstleistern. Die feste Durchlaufzeit dieser Dienstleister beträgt 5 BKT (mit wenigen Ausnahmen, bei welchen die Durchlaufzeit 10 BKT, 15 BKT oder 20 BKT beträgt).

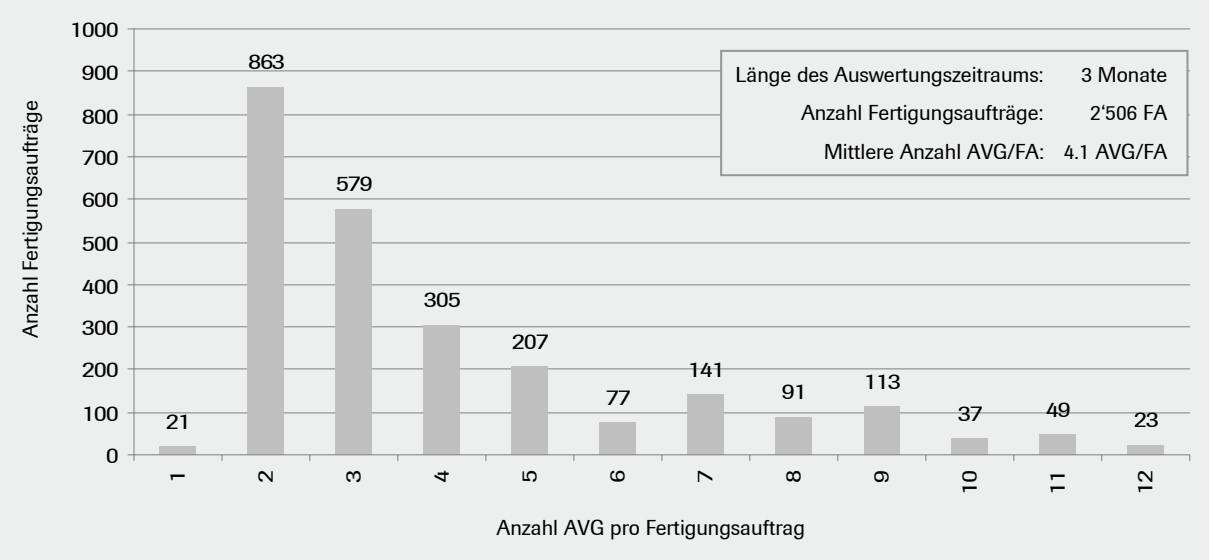


Abbildung 86: Übersicht über die Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag (Unternehmung B)

Der Auswertungszeitraum des zweiten Industrievergleichs erstreckt sich ebenfalls über drei Monate. In dieser Dauer wurden durch den Fertigungsbereich der Unternehmung B insgesamt 2'506 Fertigungsaufträge abgewickelt. Die mittlere Anzahl Arbeitsvorgänge dieser Fertigungsaufträge beträgt 4.1 AVG. Wiederum sind bei dieser Betrachtung nur Arbeitsvorgänge mit einer Auftragszeit grösser Null berücksichtigt (sogenannte „Meilenstein"-Arbeitsvorgänge, wie sie gewisse Softwareanbieter verwenden, wurden ausgeblendet.) DieAbbildung 86 gibt einen Überblick über die Zusammensetzung der 2'506 Fertigungsaufträge, welche in den Auswertungszeitraum fallen.

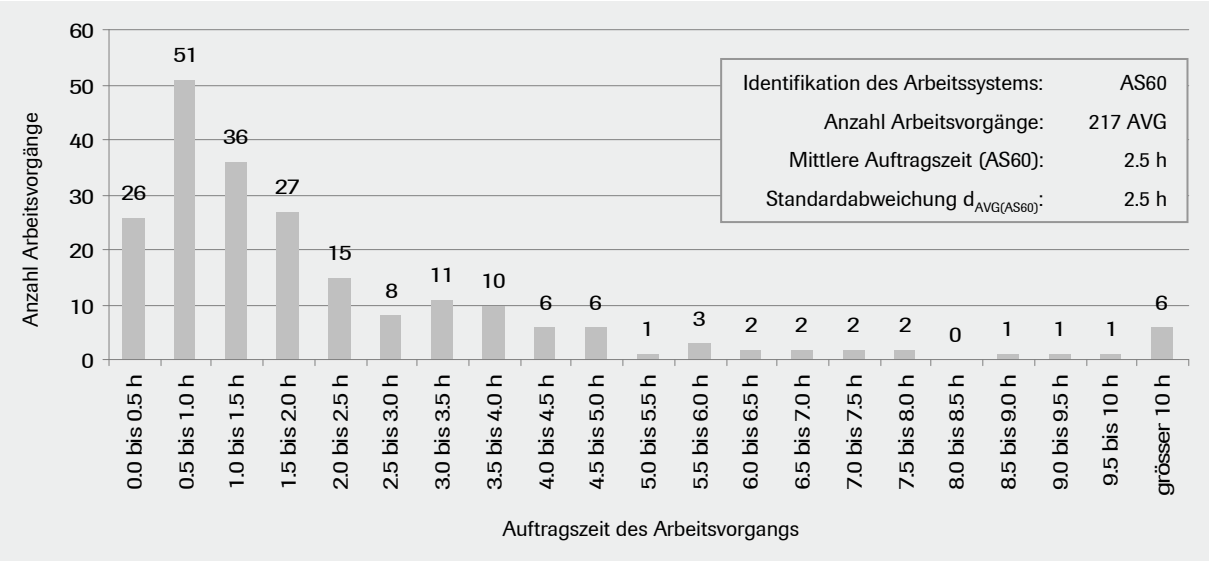


Abbildung 87: Streuung der Auftragszeiten an einem Arbeitssystem (AS60) der Unternehmung B

Analog zum ersten Industrievergleich wird zufällig ein Arbeitssystem gewählt, um die Zusammensetzung der Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem zu illustrieren. Es handelt sich dabei um das AS60, ein mechanisches Bearbeitungszentrum. Dieses wird während des Auswertungszeitraums von 217 Fertigungsaufträgen durchlaufen, was knapp 8 % der Gesamtmenge der Fertigungsaufträge entspricht. Gleich wie beim ersten Industrievergleich wurden die effektiven Auftragszeiten in Klassen eines Halbstundenrasters auf der Abszisse angeordnet und die Anzahl Fertigungsaufträge pro Werteklasse auf der Ordinate gezählt. Das Resultat ist in Abbildung 87 dargestellt. Die mittlere Auftragszeit eines Arbeitsvorgangs am AS60 $\overline{d_{AVG,AS60}}$ beträgt 2.5 h. Die Standardabweichung der Auftragszeiten am AS60 ist gross (bezogen auf den Mittelwert beträgt die Standardabweichung

100 %). Es liegt aus fertigungstechnischer Sicht eine anspruchsvolle Aufgabe vor, die Fertigungsaufträge termingerecht fertig zu stellen (streuende Auftragszeiten pro Arbeitssystem und eine variable Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag). Wiederum ist es nicht das Ziel des Industrievergleichs, die Belastung der Arbeitssysteme zu glätten (unabhängig der Frage hinsichtlich der Möglichkeit). Auch bei diesem Industrievergleich besteht die Absicht in der Prüfung, ob das Steuerungs- und Regelungsverfahren die Aufgaben in einem Umfeld derart komplexer Fertigungsstrukturen effizient erledigen kann.

Vergleich der Durchlaufzeiten

Das Ergebnis der Durchlaufzeit, wiederum zuerst aus der Industrie durch die Firma B, ist in Abbildung 88 in Form von hellgrauen Säulen dargestellt. Gegenstand der Auswertung bilden die 2'506 Fertigungsaufträge mit einem Sollendtermin innerhalb des betrachteten Auswertungszeitraums.

Aus der Abbildung 88 lässt sich ablesen, dass knapp 30 % aller Fertigungsaufträge eine Durchlaufzeit ausweisen, die kürzer als 5 BKT ist. Insgesamt die Hälfte der 2'506 Fertigungsaufträge hat den Fertigungsdurchlauf in weniger als 10 BKT absolviert. Dagegen haben knapp 6 %, das entspricht 150 Fertigungsaufträgen in einem Auswertungszeitraum von 3 Monaten, eine Durchlaufzeit, die länger als 50 BKT dauert. Die Erklärung dazu liegt im Unterbruch der Bearbeitung gewisser Fertigungsaufträge. Das bedeutet, dass bereits ausgelöste Fertigungsaufträge aufgrund der Existenz anderer Fertigungsaufträge mit einer (vermeintlich) höheren Dringlichkeit gesplittet werden, um eine baldige Fertigstellung von zumindest einem Teil des Fertigungsloses zu erzielen. Der andere Teil weicht vorerst den dringlicheren FA und wird zu einem späteren Zeitpunkt zu Ende bearbeitet. Im Rahmen der Steuerungs- und Regelungsstrategie ist der Unterbruch eines bereits begonnen Arbeitsvorgangs nicht möglich (siehe Abschnitt 4.3.3).

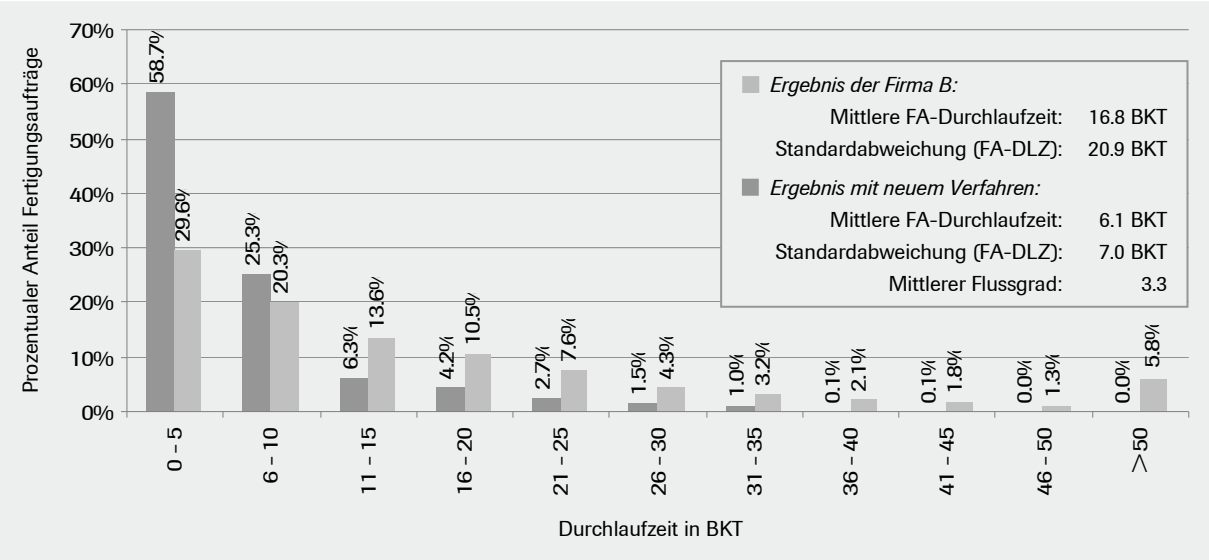


Abbildung 88: Gegenüberstellung des Durchlaufzeitergebnisses der Firma B mit dem Durchlaufzeitergebnis, das mit dem neuen Steuerungs- und Regelungsverfahren erzielt wurde

Die mittlere Durchlaufzeit während des Auswertungszeitraums beträgt 16.8 BKT (siehe Abbildung 88). Die Standardabweichung mit einem Wert von 20.9 BKT ist gross (in Relation zum Mittelwert beträgt sie 125 %) und verdeutlicht die grosse Streuung der erzielten Durchlaufzeiten. Eine grosse Streuung ist allerdings charakteristisch für die fokussierten Fertigungsstrukturen mit einer variablen Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag (siehe Abbildung 86) und streuenden Auftrags-

zeiten pro Arbeitsvorgang an den Arbeitssystemen (siehe Abbildung 87). Analog dem ersten Industrievergleich werden dieselben Fertigungsaufträge der Unternehmung B aus dem Auswertungszeitraum mit dem in Abschnitt 4 vorgestellten Verfahren in einem Simulationsexperiment umgesetzt. Ebenfalls in der Abbildung 88 ist das Ergebnis der erzielten Durchlaufzeiten mit dem Steuerungs- und Regelungsverfahren dargestellt (dunkelgraue Säulen).

Auch im zweiten Industrievergleich mit der Firma B liegen die offensichtlichsten Unterschiede bei den beiden extremsten Wertegruppen (Durchlaufzeiten kleiner 5 BKT und Durchlaufzeiten grösser 50 BKT). Die Anzahl Fertigungsaufträge mit kurzen Durchlaufzeiten (Werte zwischen 0 und 5 BKT) kann mit dem Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie beinahe verdoppelt werden. Gleichzeitig existieren bei einem Fertigungsablauf nach dem neuen Verfahren keine Fertigungsaufträge, die eine Durchlaufzeit grösser als 46 BKT besitzen (im Unterschied zur Praxis mit über 7 %). Die längste Durchlaufzeit mit der Steuerungs- und Regelungsstrategie beträgt 45 BKT. Es handelt sich dabei um einen Anteil von 0.1 %, was 2 bis 3 Fertigungsaufträgen entspricht. 98.8 % der 2'506 Fertigungsaufträge weisen eine Durchlaufzeit aus, die kürzer als 30 BKT ist und über 90 % der Gesamtmenge kommen auf einen maximalen Durchlaufzeitwert von 15 BKT.

Mit dem Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie wurde die mittlere Durchlaufzeit, im Vergleich mit dem durch die Firma B erzielten Wert von 16.8 BKT, auf einen Wert von 6.1 BKT reduziert. Das entspricht einer Verbesserung von knapp 64 %. Die Standardabweichung der Durchlaufzeit ist auch bei Verwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie gross (ca. 116 % bezogen auf den Mittelwert). Die Begründung dafür ist die dieselbe wie in der Praxis: die fokussierte Fertigungscharakteristik mit einer variablen Anzahl Arbeitsvorgänge pro Fertigungsauftrag und schwankendem Arbeitsinhalt pro Arbeitsvorgang. Der mittlere Flussgrad, der sich durch Anwendung des neuen Verfahrens ergibt, hat gemäss Abbildung 88 einen Wert von 3.3 und liegt somit auch im definierten Zielwertbereich (siehe Abschnitt 2.2.2).

Vergleich der Terminabweichungen/Termintreue

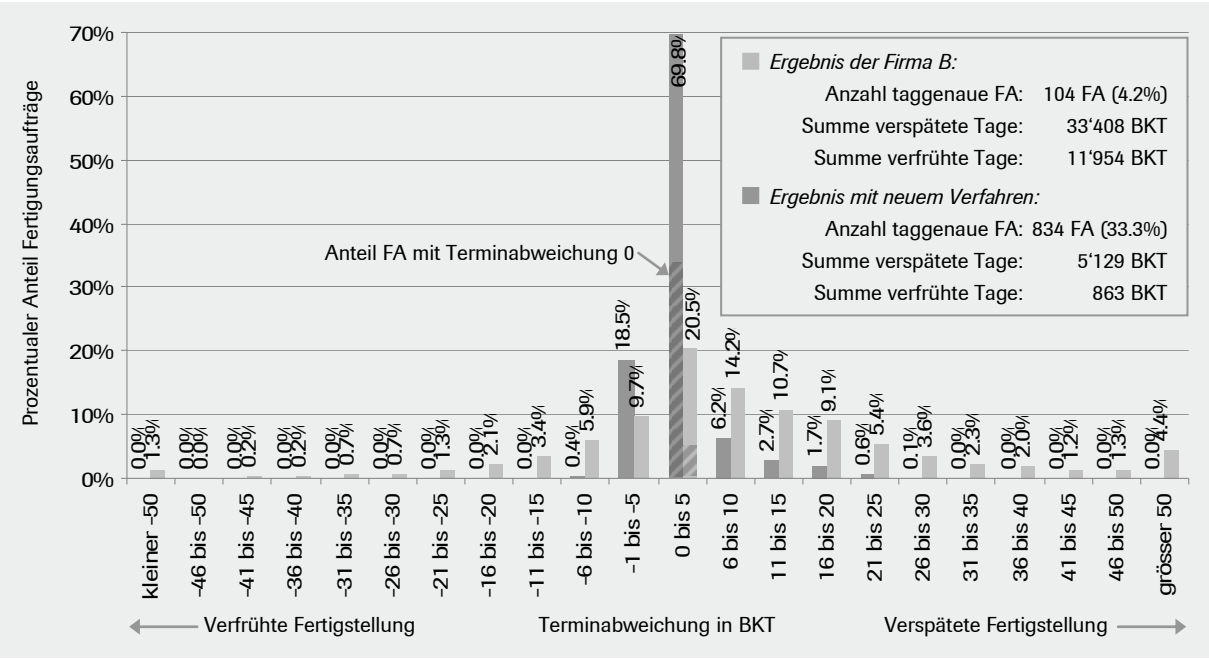


Abbildung 89: Gegenüberstellung des Terminabweichungsergebnisses der Firma B mit dem Terminabweichungsergebnis, das mit dem neuen Steuerungs- und Regelungsverfahren erzielt wurde

Für die Ermittlung der Terminabweichung und die Berechnung der Termintreue werden die Rückmeldedaten während des Auswertungszeitraus der Unternehmung B ausgewertet (analoges Vorgehen wie beim ersten Industrievergleich mit der Unternehmung A). Die Ergebnisse aller 2'506 Fertigungsaufträge sind in Abbildung 89 zusammenfassend dargestellt (hellgraue Säulen). Nach (2.17) bedeutet auch in diesem Fall eine negative Terminabweichung, dass der FA vor seinem Sollendtermin fertig gestellt wurde. Eine verspätete Fertigstellung des Fertigungsauftrags drückt sich demnach durch eine positive Terminabweichung aus.

Der Blick auf die Abbildung 89 lässt erkennen, dass das terminliche Ergebnis der Firma B nicht befriedigend ist. Die Verteilung erstreckt sich über einen weiten Wertebereich. Das Schwergewicht ist zwar erkennbar, jedoch nicht ausgeprägt. Ein Fünftel aller Fertigungsaufträge wird mit einer Verspätung zwischen 0 und +5 BKT fertig gestellt. Die Ermittlung der Termintreue erfolgt wiederum nach (2.18) mit einer Unter- und Obergrenze der zulässigen Abgangsterminabweichung von 0 BKT. Nur jeder 25igste Fertigungsauftrag (4.2 %) wird taggenau beendet (in Abbildung 89 schraffiert dargestellt). Mehr Fertigungsaufträge als taggenau fertig gestellt werden, nämlich 4.4 %, weisen eine Verspätung von über 50 BKT aus. Ebenso ist der Anteil der Fertigungsaufträge, die mehr als 50 BKT zu früh beendet wurden, mit einem Anteil von 1.3 % hoch. Die Summe der verspäteten resp. verfrühten Tage (siehe Kasten in Abbildung 89) unterstreicht diese Erkenntnis. Es handelt sich dabei jeweils um die absoluten Summe aller Terminabweichungen mit demselben Vorzeichen sämtlicher 2’506 Fertigungsaufträge aus dem Auswertungszeitraum. Die Summe der verfrühten Tage beträgt 11'954 BKT und ergibt sich aus 25.5 % der Fertigungsaufträge. Die Summe der verspäteten Tage beträgt gar 33'408 BKT und ist das Ergebnis der verbleibenden knapp 75 % der Gesamtmenge der Fertigungsaufträge.

Das Ergebnis der Terminabweichungen unter Anwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie ist ebenfalls in Abbildung 89 (dunkelgraue Säulen) zusammengefasst. Der Anteil der Fertigungsaufträge, die eine Terminabweichung zwischen 0 und +5 BKT ausweisen, konnte mit dem Verfahren von 20.5 % auf knapp 70 % gesteigert werden (siehe Abbildung 89). Diese Verbesserung schlägt sich sowohl in der Summe der verspäteten als auch verfrühter Tage nieder: jene der verspäteten Tag hat sich um den Faktor 6 auf 5'129 BKT reduziert und die Summe der verfrühten Tage hat beinahe um Faktor 14 abgenommen (863 BKT).

Eine deutliche Verbesserung zeigt sich auch in den maximalen Terminabweichungen. Die grösste negative Terminabweichung durch Anwendung des neuen Verfahrens beträgt -10 BKT. Die grösste positive Terminabweichung (verspätete Fertigstellung) ist kleiner als 30 BKT. Ungefähr 88 % der insgesamt 2'506 Fertigungsaufträge weisen eine Terminabweichung aus, die betragsmässig kleiner als -5 resp. +5 BKT ist (gegenüber einem Anteil von rund 30 % in der Praxis). Der Anteil dieser Fertigungsaufträge konnte demnach beinahe verdreifacht werden.

Die Termintreue der taggenauen Fertigungsaufträge (Unter- und Obergrenze der zulässigen Abgangsterminabweichung) beträgt beim Fertigungsablauf nach dem neuen Verfahren 33.3 %. Das sind ungefähr 8.5 mal mehr Fertigungsaufträge, die ihrem Sollendtermin entsprechend beendet wurden.

Vergleich der Auslastung

Auf eine detaillierte Darstellung der Auslastungsanalyse analog wie im ersten Industrievergleich wird an dieser Stelle verzichtet. Der Vergleich wird auf das Ergebnis, die Summe der Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum, reduziert.

Die Anzahl der Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum im Simulationsexperiment ist um 4.9 % kleiner als die Anzahl fertig gestellter Fertigungsaufträge durch die Firma B während demselben Zeitraum. Somit ist die effektiv erbrachte Leistung des Fertigungssystems durch den Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie geringer als in der Realität.

Damit Gleiches mit Gleichem verglichen wird muss für diese Betrachtung der Umstand berücksichtigt werden, dass in der Realität während dem Auswertungszeitraum an fünf Samstagen (von insgesamt 14 Samstagen) durch die Firma B gearbeitet wurde. Dies lässt sich aus den Datumsstempeln der Arbeitsvorgangsrückmeldungen ermitteln. Im Simulationsexperiment wird während dem gesamten Auswertungszeitraum an keinem Samstag gearbeitet. Somit liegen nicht exakt dieselben Kapazitätsangebote vor.

Die Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum aus der Realität wird mit dem Faktor [6]0.9333 multipliziert. Dieser Faktor berücksichtigt die fünf von insgesamt 14 Samstagen (siehe Fussnote). Nach dieser Anpassung ist die Anzahl Fertigungsaufträge mit einem Istendtermin im Auswertungszeitraum im Simulationsexperiment um 1.9 % grösser als in der Realität. Die erbrachte Leistung (und durch die Kapazitätskorrektur auch Auslastung) bei Anwendung der Steuerungs- und Regelungsstrategie ist grob betrachtet deckungsgleich (leicht grösser).

Vergleich der Bestände

Unter der Voraussetzung der Richtigkeit des Gesetzes nach Little (siehe Abschnitt 2.4.1) und der Trichterformel (siehe Abschnitt 2.4.3) kann davon ausgegangen werden, dass sich das mittlere Bestandsniveau proportional zur mittleren Durchlaufzeit um knapp 64 % gesenkt hat.

Berücksichtigung technischer Störungen

Aufgrund der Robustheit der Steuerungs- und Regelungsstrategie in Bezug auf technische Störung (siehe Nachweis im ersten Industrievergleich) wird im Rahmen des zweiten Industrievergleichs auf die wiederholte Durchführung einer Sensitivitätsanalyse verzichtet.

5.3.6. Zusammenfassung der beiden Industrievergleiche

Der Zweck der zwei Industrievergleiche aus Abschnitt 5.3.4 und 5.3.5 besteht darin, die Effektivität der Steuerungs- und Regelungsstrategie, wie sie in Abschnitt 4 vorgestellt wurde, zu validieren.

Zusammenfassung der Ergebnisse		Mittlere DLZ ($\overline{d_{FA}}$)	Mittlerer Flussgrad ($\overline{\Theta}$)	Termintreue (T*)
Erster Industrie-vergleich	Ergebnisse der Firma A	9.7 BKT	-	18.2 %
	Ergebnisse mit dem neuen Verfahren	5.1 BKT	3.4	39.3 %
	Verbesserunspotential	≈ 48 %	-	≈ 115 %
Zweiter Industrie-vergleich	Ergebnisse der Firma B	16.8 BKT	-	4.2 %
	Ergebnisse mit dem neuen Verfahren	6.1 BKT	3.3	33.3 %
	Verbesserungspotential	≈ 64 %	-	≈ 693 %

$^{*}\Delta t_{FAAbUG} = \Delta t_{FAAbOG} = 0$

Abbildung 90: Zusammenfassung der Ergebnisse betreffend Durchlaufzeit, Flussgrad und Termintreue aus den beiden Industrievergleichen mit dem jeweiligen Verbesserungspotential

[6] Faktor zur Kapazitätskorrektur = 0.9333 = 5 Arbeitstage / (5 Arbeitstage + (5 Samstage / 14 Samstage))

Dazu wurde das neue Verfahren in einem Simulationsmodell abgebildet, welches eine Fertigungsauftragsliste aus der Praxis abarbeiten muss. Die Ergebnisse aus der Industrie sowie die Resultate, die durch den Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie in einem Simulationsexperiment erzielt wurden, sind in Abbildung 90 zusammenfassend dargestellt. In derselben Abbildung sind die resultierenden Verbesserungspotentiale der Zielgrössen Durchlaufzeit und Termintreue quantifiziert.

Die zwei Unternehmen gehören unterschiedlichen Branchen an. Die einzige Gemeinsamkeit der beiden Firmen liegt in der diskreten, komplexen und variantenreichen Struktur ihrer Fertigungsbereiche. Der Nachweis der vergleichbaren (leicht besseren) Leistung resp. Auslastung des Steuerungs- und Regelungsverfahren wurde für beide Industrievergleiche erbracht. Betreffend der Zielgrösse Bestand wird, unter Annahme der Richtigkeit der Theorie (Little's Law in Abschnitt 2.4.1 und die Trichterformel in Abschnitt 2.4.3), eine zum Durchlaufzeitpotential proportionale Verbesserung postuliert. Der mittlere Flussgrad, der jeweils nur bei Anwendung des neuen Verfahrens (im Simulationsexperiment) ermittelt wird, liegt in beiden Fällen mit einem Wert von 3.3 resp. 3.4 im Zielwertbereich gemäss (2.9) im Abschnitt 2.2.2.

6. Abschliessende Betrachtungen

6.1. Erfüllungsgrad der vorliegenden Arbeit

Das Ziel des Promotionsvorhabens ist die Entwicklung einer für die Praxis bestimmten Methode einer Steuerungs- und Regelungsstrategie für produktionstechnische Systeme (siehe Abschnitt 1.4.1). Bei der vorgestellten Lösung handelt es sich um eine Heuristik (oder heuristische Methode) zur dynamischen Steuerung und Regelung von Fertigungssystemen. Eingangsgrösse ist eine Liste mit Fertigungsaufträgen, die es durch das Fertigungssystem nach den Regeln der Methode abzuarbeiten gilt. Diese „Eingangs"-Liste wird durch eine übergeordnete, zentrale Stelle (Planung) verfasst. Die Steuerungs- und Regelungsstrategie stellt keinen ERP/MRP II-Ersatz dar, sondern wirkt als Ergänzung zu bereits implementierten Planungs-Systemen. Insofern ist die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit aus struktureller, architektonischer Sicht erfüllt.

Bei der entwickelten Methode werden die Sichten „Arbeitssystem" und „aktueller Auftragsbestand" vereint. Dies ermöglicht die Synchronisation der Dimensionen System (Bestand, Auslastung) und Auftrag (Durchlaufzeit, Termintreue). Durch diese Synchronisation resultiert eine zustandsbedingte Lösung des Polylemmas der Fertigungstechnik (siehe Abschnitt 2.3.5).

Die entwickelte und in Abschnitt 4 vorgestellte Methode ist eine in sich geschlossene Lösung hinsichtlich der Steuerungsaufgaben der PPS-Funktionalitäten (im Sinne eines Verfahrens). Sie erlaubt eine situationsbedingte und/oder zielorientierungsbedingte Anpassung in den verwendeten Entscheidungstabellen in Abschnitt 4.5.3. Dadurch ist die Möglichkeit einer fallspezifischen Strategieverfolgung gegeben. Unter diesem Gesichtspunkt ist der Name „Strategie" gerechtfertigt.

Das zentrale Element der Methode ist der Prio-Quotient, welcher pro Fertigungsauftrag ermittelt wird. Der Prio-Quotient ist ein Mass der Auftragsdringlichkeit. Dazu wird die für den verbleibenden Durchlauf des Fertigungsauftrags benötigte Dauer (unter Berücksichtigung der aktuellen Bestandssituationen der betroffenen Arbeitssysteme) ins Verhältnis der verbleibenden Dauer (Sollendtermin des Fertigungsauftrags) gesetzt. Der Wert wird ereignisorientiert aktualisiert. Durch diesen geschlossenen Wirkungsablauf (Regelkreis) ist es möglich, auf kurzfristige Einflüsse, die auf das Fertigungssystem wirken, entsprechend zu reagieren. Die in Abschnitt 1 gestellte Forderung, auf stochastische Störgrössen im kurzfristigen Zeithorizont reagieren zu können, ist erfüllt.

6.2. Potentielle Schwächen oder Defizite des Verfahrens

Grundsätzlich ist die der Arbeit zugrunde liegende Aufgabenstelllung erfüllt (siehe Abschnitt 6.1). Die folgenden Abschnitte bezwecken, mögliche kritische Punkte offen zu legen und diesbezüglich Klarheit zu schaffen.

6.2.1. Keine Verwendung einer zentralen Zielfunktion

Die Steuerungs- und Regelungsmethode verwendet keine explizite Zielfunktion, welche die Zielgrössen gemäss Abschnitt 2.3 vereint. Implizit werden die vier produktionslogistischen Zielgrössen aus Abbildung 7 laufend berücksichtigt. In Abhängigkeit des Zustands (Unterlast, Überlast und Blockade) sowie unter Einbezug der Dringlichkeit des Fertigungsauftrags (Prio-Quotient) werden die Steuerungsentscheide festgelegt. Es resultiert eine zustandsbedingte Entscheidungsfindung bei gesamtheitlicher Berücksichtigung der Zielgrössen. Dies geschieht wie folgt:

Die Zielgrösse *Bestand* (siehe Abschnitt 2.3.1) wird nicht direkt minimiert. Sie wird indirekt über die Verfolgung kurzer Durchlaufzeiten gemäss der Trichterformel (2.21) optimal gehalten. Optimal

wird in dem Sinn verstanden, dass der Aufbau von Beständen vor den einzelnen Funktionsplätzen grundsätzlich zu vermeiden ist. Um einen konstanten Arbeitsfluss aufrecht zu erhalten sind sie jedoch notwendig. Der angebrachte Umfang wird für jedes Arbeitssystem periodisch unter Berücksichtigung der effektiven Auftragslast ermittelt (siehe Abschnitt 4.4.3, Steuerbestand). Das Ergebnis dient als Führungsgrösse für die diskreten Regelungsentscheide durch die Arbeitssysteme.

Die Zielgrösse *Durchlaufzeit* (siehe Abschnitt 2.3.2) ist grundsätzlich ein Ergebnis der Auftragslast (in Form der Fertigungsauftragsliste) des Gesamtsystems. Sie wird durch den Blockadebestand (siehe Abschnitt 4.4.4) begrenzt. Der Blockadebestand limitiert den zulässigen Bestandsaufbau an den Arbeitssystemen, was sich nach der Trichterformel positiv auf die Durchlaufzeiten auswirkt. Dabei müssen keine Auslastungsverluste des Arbeitssystems in Kauf genommen werden. Der Blockadebestand hat somit einen analogen Effekt wie die Belastungsschranken bei den Verfahren BOA (siehe Abschnitt 3.4.5) und DBF (siehe Abschnitt 3.4.10). Die Freigabe der Fertigungsaufträge wird unter Berücksichtigung der Prio-Quotienten entschieden. Dadurch erfolgt die Freigabe nicht auf Basis von Planwerten, sondern aufgrund der tatsächlichen Auftragsdringlichkeit durch Berücksichtigung des Zustands des Fertigungssystems. Dadurch wird der Wirkungsrichtung des Fehlerkreises der Fertigungsplanung (siehe Abschnitt 2.3.6) entgegen gewirkt, da es nicht möglich ist, eine schlechte Termintreue durch frühere Fertigungsauftragsfreigaben zu kompensieren.

Die Zielgrösse *Auslastung* (siehe Abschnitt 2.3.3) wird, im Gegensatz zum traditionellen Verständnis aus den Zeiten des Verkäufermarkts, nicht maximiert. Sie wird als Ergebnis der Auftragslast (Anzahl Fertigungsaufträge resp. Arbeitsinhalt in der Auftragsliste) aufgefasst. Die Steuerungs- und Regelungsmethode kann den Umfang des Arbeitsinhaltes in Form von Auftragszeiten nicht beeinflussen. Dieser wird durch die übergeordnete, zentrale Stelle (Planung) festgelegt und gilt für die Steuerung als Vorgabe. Die Maximierung der Auslastung kann indirekt über Generieren von z.B. Lageraufträgen erreicht werden. Diese Aktivität ist nicht Bestandteil des Funktionsumfangs einer Fertigungssteuerung.

Die Zielgrösse *Termintreue* (siehe Abschnitt 2.3.4) findet sowohl indirekt als auch direkt Eingang in die Entscheidungsfindung der dezentralen Elemente (Arbeitssysteme). Der indirekte Eingang findet durch die diskrete Ermittlung des Prio-Quotienten der Fertigungsaufträge statt. Der direkte Eingang erfolgt in Form einer Bedingung in der Entscheidungstabelle „ET Auftragsbearbeitung (letzter AVG)“.

Obwohl die Methodik über keine zentrale Zielfunktion verfügt, wurde gezeigt, dass die Steuerentscheide zustandsbedingt, in einem Gesamtkontext des Fertigungssystems und mit gesamtheitlicher Berücksichtigung der Zielgrössen festgelegt werden. Die Gewichtung der einzelnen Zielgrössen ist abhängig vom Betriebszustand des Arbeitssystems und unterscheidet sich somit situativ. Dabei wird die Gewichtung nicht quantitativ erfasst, sondern nimmt die dem Betriebszustand adäquate Relevanz an (kosten-, durchlauf- oder durchsatzoptimal). Der Ausbau der Methodik mit einer zentralen, für das Gesamtsystem gültigen, Zielfunktion setzt ein modifiziertes Strukturkonzept der Verfahrensabläufe voraus. Dazu ist es u.a. notwendig, die zentrale Funktion auf die einzelnen Arbeitssysteme zu applizieren. Das schränkt die Flexibilität der Arbeitssysteme ein und kann beispielsweise zum Deadlock des Systems führen. Eine entsprechende Anpassung resp. Erweiterung der Methodik wird im Ausblick aufgeführt (siehe Ausblick, Abschnitt 6.8).

6.2.2. Keine Kapazitätssteuerung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Steuerungs- und Regelungsstrategie verfügt über *keine* explizite Kapazitätssteuerung. Es sind hauptsächlich zwei Gründe, weshalb bei der Entwicklung und Simu-

lationsrealisation der Steuerungs- und Regelungsstrategie keine Kapazitätssteuerung berücksichtigt wurde:

- Möglichkeit von zusätzlichen Einschränkungen in Bezug auf das Anwendungsgebiet:

  Flexible Kapazitäten bedingen in der Regel auch flexible Arbeitszeiten der Mitarbeiter. Somit hängt die Realisierung einer Kapazitätssteuerung von der Organisationsflexibilität ab. Falls eine solche vorhanden ist sind zusätzlich auch die jeweils organisationsspezifischen Besonderheiten zu berücksichtigen. Die Steuerungs- und Regelungsstrategie wurde aufgrund fertigungsstruktureller Aspekte fokussiert (siehe Abschnitt 1.4.3). Mit der Realisation einer allgemeingültigen Kapazitätssteuerung von Beginn an hätte das Risiko bestanden, dass man das Einsatzgebiet des Verfahrens aufgrund organisatorischer Begebenheiten unbewusst eingeschränkt hätte.

- Zulässigkeit der Industrievergleiche setzt identische Kapazitätsangebote voraus:

  Von Beginn der Arbeit an war klar, dass die Validierung der Steuerungs- und Regelungsstrategie mindestens einen Industrievergleich benötigt. Um die im Industrievergleich erzielten Ergebnisse vergleichen zu können sind identische Kapazitätsangebote eine Voraussetzung. Durch eine Kapazitätssteuerung, welche täglich auf jedes Arbeitssystem unterschiedlichen Einfluss hat, wäre diese Voraussetzung gebrochen und somit bestände auch keine Zulässigkeit der Industrievergleiche.

Die Steuerungs- und Regelungsstrategie lässt manuelle Anpassungen der Kapazitäten zu (siehe Abschnitt 4.7.5). Dadurch wird die Praxiskompatibilität weiterhin breit gehalten und gelegentliche Sonderschichten, wie sie in der Praxis vorkommen, stellen kein Einsatzhindernis für die Steuerungs- und Regelungsstrategie dar. Die manuelle Anpassung wirkt insofern unmittelbar, dass sich die betroffenen Arbeitssysteme per sofort an den modifizierten Schichtplan halten und entsprechend länger oder weniger lang arbeiten. Die Berücksichtigung der Kapazitätsanpassung in der Führungsgrösse Steuerbestand erfolgt im Rahmen der nächsten, periodisch durchgeführten Berechnung des Steuerbestands.

Zusätzlich bietet das Verfahren die Voraussetzungen für die Erweiterung mit einer Kapazitätssteuerung (siehe Abbildung 49, 7. Kriterium der Morphologie). Durch die periodische (tägliche) Ermittlung der Leistungsforderung pro Arbeitssystem sind die Voraussetzung für eine Kapazitätssteuerung in hoher Qualität gegeben (siehe Abbildung 55). Die Leistungsforderung wird im regulären Ablauf direkt mit der zur Verfügung stehenden Kapazität des entsprechenden Arbeitssystems verglichen (siehe Abbildung 56). An diesem Punkt im Ablauf ist es beispielsweise möglich, die Steuerung der Kapazitäten pro Arbeitssystem vorzunehmen. Im Ablaufdiagramm in Abbildung 72 entspricht diese Realisierung einem zusätzlichen Element zwischen dem Element 8 (Leistungsforderung berechnen) und dem Element 9 (Steuerbestand ermitteln). Die Kapazität kann mittels Schwellwerten im Rahmen von definierten Deltas angepasst werden. Z.B. ergäbe eine Leistungsforderung kleiner als der Schwellwert 50 % (bezogen auf die Kapazität des AS) einen Deltasprung der AS-Kapazität von - 30 %. Die Kapazität des Arbeitssystems würde aufgrund einer geringen Leistungsforderung nach unten angepasst (Kostenoptimierung). Analog liesse sich auch eine Korrektur der Kapazität nach oben vornehmen. Die Ermittlung des Steuerbestands im Ablaufdiagramm der Abbildung 72 (Element 9) bezieht sich bereits auf die angepasste Kapazität. Voraussetzung ist, dass die arbeitssystemspezifischen Schwellwerte und Kapazitätsdeltas mit der Flexibilität der Organisation übereinstimmen und durch diese wahrgenommen werden.

6.2.3. Fehlende Losgrössenoptimierung

An gewissen Textstellen der vorliegenden Arbeit kann der Eindruck entstehen, dass eine Losgrössenoptimierung notwendig ist. Mit Optimierung wird eine Abwägung kleiner Lose zur Erreichung eines guten Flussgrades gegen grosse Lose zur Minimierung von unwirtschaftlichen Rüstzeiten verstanden. Dieses Thema bildet bereits Gegenstand zahlreicher Publikationen. Der entscheidende Grund für den Ausschluss von dieser Arbeit ist folgender:

- Die Funktion „Losgrössenbildung“ ist nach Abschnitt 2.1 Bestandteil des Planungsprozesses im Zusammenhang mit der Werkstattauftragsbildung (Abbildung 4). Somit ist die Losgrössenbildung nicht Inhalt dieser Arbeit und schränkt die Einsatzmöglichkeit nicht a priori ein.

Weiter könnte auch erwähnt werden, dass im Rahmen der Industrivergleiche die identischen Fertigungsaufträge umgesetzt werden müssen. Ausserdem zählt eine variable Beanspruchung der Arbeitssysteme zu den Charaktereigenschaften der fokussierten Fertigungsstruktur.

Zur Aufrechterhaltung eines gewissen minimalen Flussgrads ist es denkbar, den Funktionsumfang der Steuerung insofern zu erweitern, dass „grosse“ Fertigungsaufträge vor Freigabe identifiziert und geteilt werden. Diese Erweiterung ist insbesondere unter der Randbedingung, dass die Arbeit von begonnenen Arbeitsvorgängen nicht unterbrochen werden darf (siehe Abschnitt 4.3.3), sinnvoll. Mittels eines Schwellwerts könnten „grosse“ Fertigungsaufträge identifiziert werden. Der Schwellwert legt fest, um das Wievielfache einer Tageskapazität ein Fertigungsauftrag die Arbeitssysteme beanspruchen darf. Wird dieser Schwellwert z.B. mit 50 % festgelegt, so darf kein Arbeitsvorgang des Fertigungsauftrags eine grössere Auftragszeit ausweisen als die halbe Tageskapazität. Andernfalls würde die Steuerung aus einem Fertigungsauftrag zwei Fertigungsaufträge machen. Die Prüfung und allfällige Splittung erfolgte unmittelbar vor der Freigabeprüfung der Fertigungsaufträge (im Ablaufdiagramm in Abbildung 72 vor Element 22 „Auftrag freigeben“).

Bem.: Die skizzierte Funktionserweiterung ist insofern fragwürdig, dass nicht die Problematik angepackt wird (Planungsprozess), sondern Symptombekämpfung betrieben wird. Falls die Idee trotzdem aufgenommen und realisiert werden soll ist der Schwellwert eine von der Fertigungsstruktur und Auftragsstruktur abhängige Grösse.

6.2.4. Mögliche Umsetzungshürden

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Entwurf handelt es sich um eine in sich geschlossene Lösung. Der Nachweis dazu besteht in der Fähigkeit, die zwei Industrievergleiche durchführen zu können (siehe Abschnitt 5.3.4 bis 5.3.6).

Das Verfahren als System verfügbar zu machen, stellt keine besondere zusätzliche Herausforderung dar. Die mathematischen Zusammenhänge sind in dieser Arbeit enthalten. Die logische Abfolge der Funktionalitäten (Reihenfolge) wird in den Abschnitten 4 und 5 aufgezeigt. In denselben Abschnitten ist die Definition der zulässigen Wertebereiche der Verfahrensparameter weitgehend dargestellt. Diese gilt es zu vervollständigen und allenfalls mit einer automatischen Plausibilisierung der gewählten Werte untereinander zu ergänzen. Ein Punkt, der in dieser Arbeit nicht dargestellt wird, ist die Gestaltung der notwendigen Schnittstellen inklusive der zukünftigen, systemtechnischen Integration in eine bestehende Systemlandschaft.

Die mehrjährige Erfahrung in der Beratungspraxis zeigt allerdings, dass ein IT-System lediglich so effektiv und effizient arbeitet, wie es durch die Nutzer zugelassen wird. Das bedeutet, dass Potentiale, wie sie im Rahmen der Industrievergleiche ausgewiesenen wurden, nur in dem Fall realisiert werden, in welchem die Nutzer das System akzeptiert haben und die entsprechenden Handlungs-

anweisungen befolgen. Im Besonderen bezieht sich diese Aussage auf Nutzer, welche die Arbeitssysteme bedienen. Diese müssen die Vorgaben betreffend Auftragsfreigabe, Auftragsbearbeitung sowie Wahl des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags einhalten. In der Praxis ist immer wieder zu erkennen, dass Nutzer das System übersteuern, da die ausgewiesene Handlungsanweisung für den durch den Nutzer bedienten Fertigungsabschnitt nicht optimal erscheinen mag. Die Konsequenzen für den gesamten Fertigungsbereich sind in der Regel für den Nutzer nicht erkennbar. Das System allerdings „arbeitet“ unter Berücksichtigung eines gesamtheitlichen Kontextes.

Die Einführung neuer Betriebsabläufe und die Gewichtung eines entsprechenden Change Managements werden in der Praxis oft unterschätzt. Es empfiehlt sich daher, diesem Punkt im Fall einer Implementierung und Einführung das entsprechende Gewicht zuzuordnen und den notwendigen Aufwand dafür vorzusehen. Die betroffenen Nutzer zu beteiligten Nutzern zu machen bedingt ein sorgfältig ausgearbeitetes und konsequent anwandtes Change Management.

6.3. Effektivität des Entwurfs

Um die Effektivität des Steuerungs- und Regelungsverfahrens nachzuweisen, wurden zwei Industrievergleiche durchgeführt (siehe Abschnitt 5.3). Die dafür verwendeten Fertigungsdaten stammen bewusst aus Unternehmen, die unterschiedlichen Branchen angehören und somit über keine vergleichbaren Fertigungsstrukturen verfügen. Die einzige Gemeinsamkeit besteht in einem hohen Komplexitätsgrad des Produktspektrums und den daraus resultierenden Fertigungsaufträgen. Diese weisen eine variable Anzahl Arbeitsvorgänge aus mit jeweils unterschiedlichem Arbeitsinhalt (Auftragszeiten). Es liegt in beiden Fällen ein komplexes Materialflusssystem vor.

Die erreichten Ergebnisse sind mit den Industriepartnern besprochen und für plausibel erklärt worden. Betreffend der mittleren Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge konnte im einen Fall ein Potential von 44 % und im anderen Fall eines von über 60 % ausgewiesen werden. Hinsichtlich der Termintreue konnte bei der Firma A die Anzahl der taggenau fertiggestellten Fertigungsaufträge um über 80 % gesteigert werden, bei der Firma B beträgt diese Anzahl das knapp 7-fache im direkten Vergleich mit den in der Realität erzielten Ergebnissen. Es wurde im entsprechenen Abschnitt erläutert, dass die Auslastung des Gesamtsystems konstant bleibt (gleiche Anzahl Fertigungsaufträge bei identischem Kapazitätsangebot während des Betrachtungszeitraums). Auf eine Messung des Bestands wurde verzichtet. Stattdessen wurde die Hypothese aufgestellt, dass dieser proportional mit der Durchlaufzeit abgenommen hat. Diese Behauptung setzt voraus, dass die Theorie nach Little (siehe Abschnitt 2.4.1) sowie die Trichterformel (siehe Abschnitt 2.4.3) ihre Gültigkeit haben.

Im ersten Industrievergleich mit der Firma A wurde eine Sensitivitätsanalyse des Verfahrens durchgeführt. Dazu wurden die technisch bedingten Störungen der Funktionsplätze gemäss Angaben des Industripartners berücksichtigt und das Simulationsexperiment wiederholt durchgeführt. Das resultierende Ergebnis (mit Störungen) im Vergleich mit dem ursprünglichen Ergebnis erlaubt den Schluss, dass das Verfahren auf technische Störungen robust reagiert. Mit „robust“ wird in dem Zusammenhang die vernachlässigbare Abweichung der Zielgrössenwerte verstanden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Kenntnissen aus der Regelungstechnik, bei welcher geschlossene Wirkungsabläufe stabilisierend auf die Führungsgrösse wirken.

In der Einleitung wurde der Stellenwert der Marktziele Durchlaufzeit und Termintreue hinsichtlich der strategischen Vorteile eines Produktionsunternehmens bereits verdeutlicht. Durch diese beiden Zielgrössen können entscheidende Differenzierungsvorteile gegenüber der Konkurrenz (Posi-

tionierung im Wettbewerb) erreicht werden, was sich auf den mittel- und langfristigen Unternehmenserfolg positiv auswirken kann. Das selbststabilisierende Verfahren unterstützt zusätzlich den Umgang im dynamischen Umfeld, in welchem sich produzierende Unternehmen heutzutage befinden. Durch den geschlossenen Wirkungsablauf des Verfahrens reagiert der Fertigungsbereich autonom auf Nachfrageschwankungen durch den Markt, sofern sich diese in der Fertigungsauftragsliste niederschlagen. Die Trägheit der Systemreaktion unterscheidet sich nach Ereignisebene. Zu- oder abnehmende Nachfragemengen werden in den Steuerbeständen der Arbeitssysteme spätestens nach einem Tag berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.4.3). Die Berücksichtigung der einzelnen, konkreten Fertigungsaufträge erfolgt ab dem nächsten Ereignis „Bearbeitungsende eines AVG“, durch welches der Steuerungsablauf mittels Steuermarke aktiviert wird.

6.4. Differenzierung zu bestehenden Verfahren

Bei einem groben Überblick über die Funktionsweise des Verfahrens kann der Eindruck entstehen, dass die Steuerungs- und Regelungstrategie Ähnlichkeiten mit bereits existierenden Verfahren ausweist. Dies trifft insbesondere auf das Conwip-Verfahren (siehe Abschnitt 3.4.3), das Verfahren der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (siehe Abschnitt 3.4.5), das Polca-Verfahren (siehe Abschnitt 3.4.9) sowie das Verfahren der Dezentralen Bestandsorientierten Fertigungsregelung (siehe Abschnitt 3.4.10) zu. Dieser Eindruck ist insofern richtig, dass sich alle Verfahren an der Erkenntnis gemäss der Produktionskennlinie (siehe Abschnitt 2.5) orientieren, dass ab einem bestimmten Betriebspunkt mit zunehmendem Bestand die Durchlaufzeit proportional ansteigt bei gleichbleibender Auslastung. Deshalb verfügen alle diese Verfahren über bestandslimitierende Mechanismen.

An dieser Stelle werden im Folgenden elementare Differenzierungspunkte zwischen dem in dieser Arbeit entwickelten Steuerungs- und Regelungsverfahren und den existierenden Verfahren zusammenfassend dargestellt. Diese Differenzierungspunkte haben nicht nur Gültigkeit in Bezug auf die eben aufgezählten Verfahren, sondern auf alle in Abschnitt 3.4 vorgestellten Verfahren. Die detaillierte Funktionsweise der Steuerungs- und Regelungsstrategie sowie die resultierende Wirkweise auf den Fertigungsablauf können im Abschnitt 4 nachgelesen werden.

1) Kein Sollstarttermin der Fertigungsaufträge notwendig

Die Steuerungs- und Regelungsstrategie gemäss Abschnitt 4 benötigt *keine planerisch ermittelten Sollstarttermine* der Fertigungsaufträge. Diese Charakteristik vereinfacht den Planungsprozess insofern, dass die Fertigungsaufträge nicht durchlaufterminiert werden müssen. Somit fällt im Planungsablauf auch kein Bedarf an Übergangszeiten in Form von Stammdaten an. Dadurch wiederum reduziert sich auch der Aufwand für die Stammdatenpflege.

Die an zentraler Stelle (Planung) erfassten Fertigungsaufträge müssen lediglich über einen Sollendtermin verfügen. Die Art und Weise (Planungsprozess), wie dieser Sollendtermin festgelegt wird, ist für das Steuerungs- und Regelungsverfahren irrelevant. Aus diesem Grund können Kundenaufträge, Prognoseaufträge und Verbrauchsaufträge in beliebigen Verhältnissen vermischt in der Fertigungsauftragsliste enthalten sein.

2) Bestandsregelung anhand einer Führungsgrösse (Steuerbestand)

Jedes Arbeitssystem (dezentrale Stellen) verfügt über einen Steuerbestand, der als *Führungsgrösse für die Bestandsregelung* verwendet wird. Bei dem BOA- und DBF-Verfahren, die der Steue-

rungs- und Regelungsstrategie in dem Sachverhalt am ähnlichsten sind, wird anstelle einer Führungsgrösse eine Belastungsschranke pro Arbeitssystem festgelegt. Diese darf nicht überschritten werden. Somit wirkt die Belastungsschranke im Unterschied zum Steuerbestand nicht als Führungsgrösse, sondern als Maximalgrösse.

Ein weiterer, entscheidender Unterschied zu diesen beiden Verfahren besteht darin, dass die Führungsgrösse Steuerbestand nicht durch eine zentrale Stelle (Planung) ermittelt wird. Die Festlegung des Steuerbestands (Führungsgrösse) ist Bestandteil des Verfahrens und wird durch die Steuerungs- und Regelungsstrategie in Abhängigkeit der *echten* Auftragslast berechnet. Als Auftragslast wird gemäss Abschnitt 4.4.4 die Summe der Auftragszeiten pro Zeitperiode und Arbeitssystem verstanden, die durch die Fertigungsaufträge in der Fertigungsauftragsliste gegeben ist. Die Auftragslast ist ein Ergebnis der Planung (gemäss dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung, siehe Abbildung 4). Je nach Planungseingriff ist die Auftragslast ein Spiegel der Nachfrage, die durch den Markt verlangt wird.

3) Zustandsbedingte Auslastung der Arbeitssysteme

Die produktionslogistische Zielgrösse Auslastung (auf Stufe Arbeitssystem) unterliegt nicht dem Dogma einer Maximierung. Die Zielgrösse Auslastung ist im Rahmen des Steuerungs- und Regelungsverfahrens als ein *Ergebnis der Auftragslast und somit der Marktnachfrage* aufzufassen. In diesem Sinne wird unter der zustandsbedingten Auslastung der Zustand des Umfelds resp. des Marktes aufgefasst. In dessen Abhängigkeit wird der Steuerbestand und somit auch die zu verfolgende Auslastung der einzelnen Arbeitssysteme definiert.

Falls in einem Verfahren die Warteschlangen vor den Arbeitssystemen (grundsätzlich) nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet werden, so wird der Arbeitsvorgang eines Fertigungsauftrags, der auf ein Arbeitssystem ohne Warteschlange trifft, unmittelbar bearbeitet. Dies trifft auf Verfahren wie beispielsweise MRPII, die über terminierte Arbeitsvorgänge verfügen, nicht zu. Das Ziel dieser Verfahren ist es, mit der Durchlaufterminierung der Fertigungsaufträge die Auslastung der Arbeitssysteme zu maximieren. Dieses Grundprinzip stammt aus der Entstehungszeit dieser Verfahren, zu welcher ein Verkäufermarkt herrschte und somit die Massenproduktion im Vordergrund stand. Die Auslastungsmaximierung ist in den „Wurzeln“ dieser Verfahren verankert.

Im Unterschied zur unmittelbaren Bearbeitung der Arbeitsvorgänge bildet das Pausieren der Arbeitssysteme trotz (eventuell) vorhandenem Arbeitsvorrat einen bewussten Verfahrensbestandteil der Steuerungs- und Regelungsstrategie. Eine tiefere Auslastung kann die unmittelbare Konsequenz sein. Der entsprechende Entscheid wird dezentral durch das Arbeitssystem getroffen. Entscheidungsgrundlagen bilden die Bestandsregelung gemäss obigem Differenzierungsmerkmal (also der Wert der Regeldifferenz), die Dringlichkeit des Fertigungsauftrags sowie der Zustand des entsprechenden Nachfolgerarbeitssystems (Arbeitssystem des nächsten Arbeitsvorgangs).

Diese zugrunde liegende Konzeption erlaubt die Konfiguration einer zustandsbedingten Entscheidungsfindung:

Im Fall von Unterlast verhält sich das Arbeitssystem *kostenoptimal*. Kostenoptimal bezieht sich in dem Fall nicht auf die Maximierung der Auslastung, da Stillstandskosten immer tiefer als Fertigungskosten sind. Kostenoptimal bezieht sich in dem Fall auf das Verständnis nach Ohno, der die Überproduktion als Verschwendung betrachtet [OHN88].

Im Fall von Überlast verhält sich das Arbeitssystem *durchlaufoptimal*. Die Auswirkung dieser Verhaltensweise wirkt sich auf die Fertigungsaufträge aus, da das Arbeitssystem die Warteschlange

abarbeiten muss um den Istbestand dem Sollbestand anzugleichen. Dabei werden weitere Kriterien wie Nachfolgerzustand und Auftragsdringlichkeit weitgehend berücksichtigt.

Im Fall von Blockade verhält sich das Arbeitssystem *durchsatzoptimal*. Es arbeitet die Warteschlange ab, wobei die Berücksichtigung weiterer Kriterien wie Nachfolgerzustand und Auftragsdringlichkeit nur noch reduziert beachtet werden.

4) Laufende, zustandsbedingte Auftragspriorisierung

Die Festlegung der Dringlichkeit der Fertigungsaufträge erfolgt durch das Steuerungs- und Regelungsverfahren selber, nicht durch eine zentrale Stelle (Planung). Dies geschieht durch die Ermittlung *des Prio-Quotienten pro Fertigungsauftrag*, welcher das Verhältnis zwischen verbleibender Dauer bis zum Sollendtermin und aktuell benötigter Dauer darstellt. Diese Bestimmung berücksichtigt somit den Zustand des Fertigungssystems. In diesem Sinne wird unter der zustandsbedingten Auftragspriorisierung der Zustand des Fertigungssystems aufgefasst (Bestandssituation aller Arbeitssysteme).

Daraus resultiert, dass sich die Auftragsdringlichkeit eines noch nicht freigegebenen Fertigungsauftrags zu einem bestimmten Zeitpunkt unterscheidet, ob das Fertigungssystem leer ist oder ob sich vor den verschiedenen Arbeitssystemen grosse Warteschlangen befinden. Somit gehorcht die Bearbeitungsreihenfolge an den Arbeitssystemen auch nicht dem FIFO-Prinzip. Sie wird durch eine abnehmende Sortierung der Auftragsdringlichkeiten (Prio-Quotienten) innerhalb der Warteschlangen festgelegt.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu den existierenden Verfahren besteht darin, dass die ermittelte Auftragsdringlichkeit (Prio-Quotient) ausschliesslich für den aktuellen Zeitpunkt Gültigkeit hat. Sie wird für jeden Fertigungsauftrag neu ermittelt, wenn der nächste Entscheidungszeitpunkt einer dezentralen Stelle (Arbeitssystem) durch ein Ereignis definiert wird. Die Auftragspriosierung ist demnach nicht nur zustandsbedingt sondern auch ereignisorientiert getrieben.

Anhand des Prio-Quotienten (also der Auftragsdringlichkeit) wird auch die Auftragsfreigabe entschieden. Dies ermöglicht den Verzicht auf einen planerisch ermittelten Sollstarttermin (siehe oben).

5) Regelkonformer Umgang mit Eil-/Expressaufträgen

Die Handhabung von Eil- resp. Expressaufträgen erfolgt im Rahmen der *regulären Verfahrensregeln*. Es sind somit keine Sonderfälle durch spezielle Zusatzregeln abzudecken, die womöglich entgegen den Grundregeln wirken. Der regelkonforme Umgang bei existierenden Verfahren ist im Falle eines FIFO-Prinzips in der Wirkung stark reduziert (auf die sofortige Auftragsfreigabe). Es sind Zusatzregeln notwendig oder der Durchlauf der Fertigungsaufträge kann durch manuelle Übersteuerung beschleunigt werden. Dabei besteht die Gefahr, den regulären Ablauf zu stören.

Diese Tatsache wird durch den Umstand ermöglicht, dass die Fertigungsaufträge in den Warteschlangen an den Arbeitssystemen nicht grundsätzlich nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet werden, sondern in der Reihenfolge ihrer Dringlichkeit (Prio-Quotienen) sortiert werden. Wenn ein neu in die Fertigungsauftragsliste gestellter Fertigungsauftrag über einen Sollendtermin in der Vergangenheit verfügt, wird dieser Fertigungsauftrag an jedem Arbeitssystem als dringlichster Fertigungsauftrag (negativer Prio-Quotient) betrachtet und im Rahmen der Sortierung der Warteschlange an oberste Stelle gestellt.

Beachte: In der Regel wird eine derartige Beschleunigung eines Fertigungsauftrags jeweils auf Kosten der anderen Fertigungsaufträge ermöglicht. Dies trägt nicht zur Beruhigung des gesamtheitlichen Fertigungsablaufs bei und aus diesem Grunde sind Eil-/Expressaufträge möglichst zu vermeiden. Sie sind allerdings ein Element der industriellen Realität und somit muss ein effektives Verfahren den entsprechenden Umgang beherrschen.

Die hier aufgeführten Punkte 1) bis 5) sind in keinem der existierenden Verfahren aus Abschnitt 3.4 enthalten. Auf eine detailliertere Differenzierung der aufgeführten Punkte wird an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechenden Erläuterungen der existierenden Verfahren in Abschnitt 3.4 verwiesen.

6.5. Erfüllung der Gestaltungsgrundsätze

Im Anschluss an die Vorstellung von zehn existierenden Steuerungsverfahren im Abschnitt 3.4 wurden im Rahmen einer abschliessenden Diskussion aus den erkannten Stärken und/oder Schwächen dieser Verfahren fünf Gestaltungsgrundsätze (GGS) abgeleitet. Es wurde der Anspruch gestellt, dass die in dieser Arbeit entwickelte Steuerungs- und Regelungsstrategie diese Gestaltungsgrundsätze erfüllt. In diesem Abschnitt wird geprüft, ob dies gelungen ist. Auf eine wiederholte Erklärung der einzelnen Gestaltungsgrundsätze, insbesondere deren Herkunftsbegründung resp. der Zweck, wird an dieser Stelle verzichtet und auf den entsprechenden Abschnitt 3.5 verwiesen.

GGS 1: Die Steuerungs- und Regelungsstrategie operiert unabhängig von Planterminen.

Die im ersten Gestaltungsgrundsatz enthaltene Forderung bezweckt, dass das Streben nach einer besseren logistischen Zielerreichung *nicht* ausschliesslich durch Investitionsprojekte in den Planungsprozess unterstützt wird. Das entspricht der Auffassung, dass Erweiterungen und Detaillierungen der Planungstools oftmals zusätzliche Komplexität anstelle von höherer Transparenz schaffen. Ein Steuerungsverfahren, das den ersten Gestaltungsgrundsatz erfüllt, stellt eine Alternative zur Optimierung der logistischen Zielerreichung dar.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Steuerungs- und Regelungsverfahren funktioniert *vollumfänglich unabhäng* sowohl von Sollstartterminen der Fertigungsaufträge als auch von geplanten Start- und Endterminen der einzelnen Arbeitsvorgänge (siehe Abschnitt 6.4, 1. Differenzierungskriterium). Der Sollendtermin der Fertigungsaufträge gilt als terminlicher Bezugspunkt für das Steuerungs- und Regelungsverfahren unabhängig vom Ermittlungsprinzip (Prognose-, Verbrauchs- oder Kundenauftragsspezifisch). Damit operiert das Verfahren unabhängig von planerisch festgelegten Terminen in dem hier erörterten Sinne und der erste Gestaltungsgrundsatz ist ohne Einschränkungen erfüllt. Dies gilt vor dem aufgeführten Hintergrund, dass die Berücksichtigung der Fertigungskapazität durch die Planung keinen Bestandteil der Planungsqualität darstellt.

GGS 2: Die Steuerungs- und Regelungsstrategie funktioniert nach dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung und ist damit kompatibel mit Verfahren, die bereits im Einsatz sind.

Die Steuerungs- und Regelungsstrategie ist derart konzipiert, dass die Fertigungsauftragsliste als Output der Planung betrachtet wird und gleichzeitig den Input für den Steuerungs- und Regelungsprozess bildet. Dies entspricht dem Verständnis der Fertigungsauftragsliste als Scharnier-

stelle zwischen Planung und Steuerung gemäss der Abbildung 4, womit der zweite Gestaltungsgrundsatz erfüllt ist.

Der Informationsbedarf der Steuerungs- und Regelungsstrategie aus der Fertigungsauftragsliste umfasst pro Fertigungsauftrag die Identifikationsnummer des Fertigungsauftrags, die entsprechende Operationsreihenfolge mit Arbeitssystemidentifikation und Auftragszeit sowie den Sollendtermin des Fertigungsauftrags. Die verbreiteten MRPII-Verfahren liefern zum Abschluss des Planungsprozesses in der Regel mehr Informationen pro Fertigungsauftrag. Es handelt sich dabei im Normalfall um berechnete Sollstarttermine der Fertigungsaufträge sowie terminierte Arbeitsvorgänge. Oft werden mit dem Fertigungsauftrag, je nach Terminierungsalgorithmus, auch sogenannte Frühest- und Spätesttermine mitgegeben.

Die erarbeitete Steuerungs- und Regelungsstrategie lässt solche zusätzlichen Informationen und Terminangaben ausser acht.

GGS 3: Auftragsanonyme Puffer sowie gesplittete Fertigungsaufträge innerhalb der Fertigung sind zu vermeiden.

Der Bestand, wie er in Abschnitt 2.3.1 definiert wurde, setzt sich aus dem offenen Arbeitsvorrat der Arbeitssysteme zusammen. Da ein Arbeitsvorgang erst nach Bearbeitungsende des Arbeitsvorgangs zurück gemeldet wird (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6), zählt auch der Fertigungsauftrag in Arbeit zum offenen Arbeitsvorrat und somit zum Bestand des Arbeitssystems. Der Bestand des gesamten Fertigungssystems besteht nach (2.11) aus den Beständen der einzelnen Arbeitssysteme. Es resultieren durch den Einsatz der Steuerungs- und Regelungsstrategie keine weiteren Bestände. Aus diesem Grund ist die Forderung des Gestaltungsgrundsatzes 3, dass keine auftragsanonymen Bestände existieren dürfen, erfüllt.

Das Steuerungs- und Regelungsverfahren reagiert auf die Rückmeldung eines gesamten Arbeitsvorgangs. Erst mit diesem Ereignis zählt der zum Arbeitsvorgang gehörende Fertigungsauftrag zur Warteschlange des Nachfolgers. Das Verfahren unterstützt demnach den Umgang mit gesplitteten Fertigungsaufträgen innerhalb der Fertigung nicht und auch der zweite Teil des dritten Gestaltungsgrundsatzes ist erfüllt.

Das Splitten von Fertigungsaufträgen bezweckt die Verkürzung der Durchlaufzeit einer Teilmenge des Fertigungsauftrags. Dies wird in der Regel auf Kosten der Durchlaufzeit der Komplementärmenge des Auftragsloses „erkauft“. Die Splittung erfolgt üblicherweise entgegen den Planungsvorgaben. In einfachen, linearen Materialflusssystemen (z.B. eine getaktete Einzelstückbearbeitung in einer Linienfertigung) kann die Splittung effektiv und auch gewollt in Form einer überlappenden Fertigung erfolgen. Unter diesen Voraussetzungen besteht kein Risiko einer Vermischung mit anderen Fertigungsaufträgen und eine den Fertigungsauftrag betreffende, eindeutige Statusaussage (vor Bearbeitung, in Bearbeitung, nach Bearbeitung) ist jederzeit möglich. Falls in einem Fertigungssystem eine oder mehrere autonome Fertigungslinien existieren, können diese als jeweils ein Arbeitssystem abgegrenzt werden. Somit ist die steuerungstechnische Integration von beliebig vielen Linienfertigungen, Fertigungszellen, etc. in das Verfahren sichergestellt.

Im Zusammenhang mit der Splittung von Fertigungslosen kommt unmittelbar die Thematik über die Bestimmung der optimalen Losgrösse auf. Dieses Thema wurde bereits in Abschnitt 6.2.3 aufgegriffen.

GGS 4: Eine Fertigungsregelung im Verständnis der Regelungstechnik erfordert eine Führungsgrösse, damit bei positiven und negativen Regeldifferenzen Stellgrössen festlegt werden können.

Das Steuerungs- und Regelungsverfahren berechnet periodisch für jedes Arbeitssystem einen Steuerbestand in Abhängigkeit der aktuellen Auftragslast (siehe Abschnitt 4.4.3). Diese Funktion bildet somit Bestandteil des Verfahrens und ist nicht dem Teilgebiet der Planung zugeordnet. Dieser Steuerbestand stellt den Sollarbeitspunkt des Arbeitssystems dar. Durch die diskrete Erfassung des Istbestands resultiert zu jedem Zeitpunkt eine messbare Bestandsdifferenz, die Stellgrösse y. Diese Stellgrösse beeinflusst *in jedem Fall* die Abwicklung der den Arbeitssystemen zugewiesenen Aufgaben Auftragsfreigabe (A1), Auftragsbearbeitung (A2) und Wahl des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags (A3). Somit ist der vierte Gestaltungsgrundsatz mit dem Anspruch auf eine Fertigungsregelung mit Führungsgrösse erfüllt.

GGS 5: Die Dringlichkeit eines Fertigungsauftrags muss jederzeit, unmittelbar und unabhängig von Planterminen feststellbar sein.

Mit der Erfüllung des ersten Gestaltungsgrundsatzes ist bereits belegt, dass das vorgestellte Steuerungs- und Regelungsverfahren ohne die Verwendung von Sollstartterminen der Fertigungsaufträge und geplanten Start-/Endtermine der Arbeitsvorgänge funktioniert. Die Beurteilung der Dringlichkeit der Fertigungsaufträge erfolgt mittels Prio-Quotienten, der für jeden Fertigungsauftrag geführt wird. Er stellt das Verhältnis von verbleibender Zeitdauer und benötigter Zeitdauer bis zum Sollendtermin (dynamische Durchlaufzeit) des Fertigungsauftrags dar. In der dynamischen Durchlaufzeit (siehe Abschnitt 4.4.1) werden die Zustände (die „Länge“ der Warteschlangen) der Arbeitssysteme berücksichtigt. Zur Bestimmung der verbleibenden Dauer ist der Sollendtermin des Fertigungsauftrags notwendig. Dieser wird nicht als einen durch die Planung frei festlegbaren Termin sondern als indirektes Spiegelbild der Marktnachfrage verstanden (siehe GGS1).

Somit stellt der Prio-Quotient eine Grösse dar, anhand welcher die Dringlichkeit eines Fertigungsauftrages absolut beurteilt werden kann. Gleichzeitig dient der Prio-Quotient auch als relative Vergleichsgrösse beispielsweise zur Sortierung der Warteschlange vor einem Arbeitssystem. Der Prio-Quotient wird sowohl für nicht freigegebene als auch für bereits freigegebene Fertigungsaufträge identisch berechnet und eingesetzt. Mit jedem Ereignis im Fertigungssystem (Arbeitsende eines Arbeitsvorgangs oder Freigabe eines Fertigungsauftrags), das Auswirkungen auf die Prio-Quotienten haben kann, wird die Berechnung der Prio-Quotienten für *alle* Fertigungsaufträge ausgelöst. Die absoluten Werte haben unmittelbare Gültigkeit. Die Werte in Relation zueinander haben bis zur nächsten Berechnung Gültigkeit, da der Zustand des Fertigungssystems bis zum nächsten Ereignis unverändert bleibt und somit auch die dynamische Durchlaufzeit. Die fortschreitende Uhrzeit und somit kontinuierliche Verkürzung der verbleibenden Dauer bis zum Sollendtermin trifft sämtliche Fertigungsaufträge in gleichem Masse.

Die Prio-Quotienten werden an zentraler Stelle (als eigene Spalte in der Fertigungsauftragsliste, siehe Abschnitt 4.4.1 und 4.4.2) geführt und sind jederzeit feststellbar. Sie werden für alle Fertigungsaufträge (noch nicht freigegebene wie auch bereits freigegebene) berechnet. Der fünfte Gestaltungsgrundsatz ist im vorgestellten Steuerungs- und Regelungsverfahren erfüllt.

6.6. Einsatzvoraussetzungen

Beim vorgestellten Steuerungs- und Regelungsverfahren handelt es sich nicht um einen Ersatz bestehender PPS-Systeme, sondern um eine Ergänzung von diesen. Diese Ergänzung wirkt nicht

im Teilgebiet Planung gemäss der klassischen Gliederung von PPS-Systemen (siehe Abbildung 4). Der Funktionsumfang bezieht sich vollumfänglich auf das Teilgebiet Steuerung. Der Output der Planung (die Fertigungsauftragsliste) stellt den Input für die Steuerungs- und Regelungsstrategie dar. Die Fertigungsaufträge in der Fertigungsauftragsliste müssen über eine Identifikationsnummer, die Arbeitsvorgangsreihenfolge mit Auftragszeit und einen Sollendtermin verfügen. Die Funktionsweise der Planung zur Erstellung/Aktualisierung der Fertigungsauftragsliste ist für das Steuerungs- und Regelungsverfahren irrelevant. Somit können in der Fertigungsauftragsliste Prognose-, Verbrauchs- und Kundenaufträge in beliebigen Verhältnissen vermischt enthalten sein.

Das Steuerungs- und Regelungsverfahren ist *nicht* branchenspezifisch ausgestaltet und somit unabhängig vom Anwendungsgebiet. Der Einsatz setzt allerdings eine diskrete Fertigung (wie z.B. die Stückgutfertigung) voraus. Dabei kann das Verfahren ein Losgrössenspektrum handhaben, das von der Einzelstückfertigung über Kleinst- und Kleinserienfertigung bis hin zu mittleren Losgrössen und grossen Losgrössen reicht. Entscheidend ist, dass zwischen den definierten Arbeitssystemen ein losweiser Transport stattfindet (siehe GGS3). Fertigungslinien resp. –zellen können zu einem Arbeitssystem zusammengefasst werden. Unter diesen Voraussetzungen ist auch der Einsatz in Montageprozessen möglich. Der Nachweis der Effektivität in diesem Anwendungsgebiet ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und somit ausstehend.

Zusammenfassend lauten die für das Verfahren geltenden (einschränkenden) Einsatvoraussetzungen:

- Diskrete Fertigung (z.B. Stückgutfertiger)
- Keine überlappende Fertigung (Transportlos gleich Fertigungslos)

Das Steuerungs- und Regelungsverfahren ist nicht für das Fertigungsprinzip der Baustellenfertigung konzipiert. Die Begründung besteht darin, dass sich beim Baustellenprinzip nicht die Fertigungsaufträge zu den Arbeitssystemen bewegen. Beim Baustellenprinzip bewegen sich die Arbeitssysteme zu den Fertigungsaufträgen. Eine entsprechende Interpretation der Handlungsanweisungen sowie eine allfällige Ableitung für dieses Fertigungsprinzip muss geprüft werden (siehe Abschnitt 6.8).

Die Steuerungs- und Regelungsstrategie wurde gezielt für den Einsatz in komplexen und variantenreichen Fertigungsstrukturen ausgelegt (siehe die Zielsetzungen in Abschnitt 1.4). In diesen Strukturen wirkt das Verfahren effektiv im Vergleich zu existierenden Steuerungsalternativen, wie im Industrievergleich mit zwei Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen gezeigt werden konnte (siehe die Zusammenfassung der Industrievergleiche in Abschnitt 5.3.6). Die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens sind breiter als der zu Beginn definierte Einsatzzweck. Die Sinnhaftigkeit, das Verfahren in einer variantenarmen Grossserienfertigung einzusetzen erscheint allerdings fragwürdig. Für solche Einsatzvoraussetzungen existieren bereits Verfahren (siehe Abschnitt 3.4), die eine gute logistische Zielerreichung erfüllen und in der Funktionsweise weniger Komplexität ausweisen als das hier vorgestellte Verfahren. Die Grenzen hinsichtlich des Einsatzgebietes sind fliessend, insbesondere da die realen Abgrenzungskriterien oft nicht eindeutig vorliegen und gelegentlich missverständlich formuliert werden können.

6.7. Offene Strategie durch Parametrierung

In Abschnitt 6.2.1 wurde erläutert, dass die implizite Zielfunktion der Steuerungs- und Regelungsstrategie die produktionslogistischen Zielgrössen Durchlaufzeit und Termintreue verfolgt. Die Verfolgung kurzer Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue bilden nach Abschnitt 2.3 die Markt-

ziele, welche für eine Unternehmung wesentliche Vorteile für die Differenzierung von der Konkurrenz und somit in der Markpositionierung mit sich bringen. Es wird unter Voraussetzung der Richtigkeit der Theorie in Abschnitt 2.4 und 2.5 davon ausgegangen, dass sich der Bestand proportional zur Durchlaufzeit verhält. Die Auslastung wird als ein Ergebnis der Marktnachfrage in Form der Fertigungsauftragsliste verstanden.

Die Architektur der Steuerungs- und Regelungsstrategie beinhaltet Entscheidungstabellen, anhand welcher die Entscheidungen der Arbeitssysteme resp. der dezentralen Stellen des Fertigungssystems festgelegt sind. Je nach Unternehmensziel können die Entscheidungstabellen entsprechend parametriert werden und unterschiedliche Fertigungsstrategien verfolgt werden. Für die Entscheidung betreffend der Auftragsfreigabe und der Auftragsbearbeitung werden die Arbeitssystemzustände berücksichtigt. Die Strategie ermöglicht somit, eine zustandsbedingte Formulierung und somit Parametrierung der Fertigungsstrategie vorzunehmen (siehe den dritten Punkt Zustandsbedingte Auslastung der Arbeitssysteme in Abschnitt 6.4).

Der in dieser Arbeit entwickelte Entwurf als Steuerungs- und Regelungsverfahren ist in sich geschlossen. Der Entwurf als Steuerungs- und Regelungsstrategie ist insoweit offen, dass die Zielverfolgung modifiziert werden kann. Der Modifikation sind allerdings Grenzen gesetzt: z.B. ist eine Maximierung der Auslastung nur insofern realisierbar, dass sich entsprechend auch die dazu notwendige Anzahl Fertigungsaufträge in der Fertigungsauftragsliste befinden.

6.8. Ausblick

Mit dem Steuerungs- und Regelungsverfahren wird der Forschungsbereich rund um das Thema Steuerungstechnick von Fertigungssystemen weiter erschlossen. Die dazu verwendeten Grundsätze und Prinzipien sind bereits bekannt (siehe Abschnitt 2.4 und 2.5). Neu sind die Konstellation, das Zusammenwirken sowie die gesamtheitliche Gestaltung und Synchronisation der Grundsätze in einem Verfahren (siehe Abschnitt 6.4). Insbesondere die Entwicklung des Prio-Quotienten eröffnet neue Umgangsformen in der Disziplin der Fertigungssteuerungstechnik.

Mit jeder Forschungsarbeit eröffnen sich in der Regel neue Forschungsbedarfe. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine in sich geschlossene, heuristische Methode. Der durch diese Arbeit generierte Forschungsbedarf, der in den oben stehenden Abschnitten bereits diskutiert wurde, wird im Folgenden zusammenfassend aufgelistet:

- Konzeption und Prüfung der notwendigen Massnahmen zur Erschliessung zusätzlicher Einsatzgebiete wie z.B. der Einsatz in einer Fertigung nach dem Baustellenprinzip.
- Nachweis der Verfahrenseffektivität beim Einsatz in Montageprozessen.
- Wirkweise und –intensität der Aufgabensynchronisation auf die Zielgrössen (Abschnitt 4.5.2).
- Erweiterung des Steuerungsverfahrens um eine explizite und für das Gesamtsystem gültige Zielfunktion. Die Gewichtung der einzelnen Zielgrössen sollte sich quantitativ am Betriebszustand des Systems orientieren.
- Grundsätzliche Untersuchung und Erhärtung der Abgrenzungsmethodik der Fertigungsprinzipien und –arten sowie die Entwicklung einer Methodik, welche die Einsatzgüte der existierenden Steuerungsverfahren anhand der zu erarbeitetenden Klassifizierungsmerkmale pro Einsatzgebiet quantitativ nachweist.
- Entwicklung eines Verfahrens für die Prozessindustrie, das auf analogen Wirkprinzipien wie dem hier vorgestellte Steuerungs- und Regelungsverfahren aufbaut.

- Entwicklung einer Integrationsstrategie des Verfahrens in bestehende PPS-Methoden unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Change Management („softfacts“).
- Umsetzung der Steuerungs- und Regelungsstrategie als IT-Tool bzw. –Modul unter Berücksichtigung einer breit umsetzbaren Integration in bestehende Systemlösungen bzw. Systemlandschaften. Die Funktionen der sich im Einsatz befindenden Systeme könnten z.B. klassifiziert werden in erforderliche, mögliche und behindernde Funktionen (aus der Perspektive des Verfahrens).

Bei allen weiteren Tätigkeiten auf dem Gebiet der Fertigungssteuerungstechnik sollte man sich bewusst vor Augen halten, dass neben der Definition und Kombination von Handlungsanweisungen die Berücksichtigung der Umsetzbarkeit einen ebenso wichtigen Erfolgsfaktor spielt (siehe Abschnitt 6.2.4). Insbesondere den Produktionsfaktor Mensch gilt es im Rahmen eines expliziten Change Managements bei der Umsetzung zu berücksichtigen. Denn jedes Verfahren wird maximal so gute Ergebnisse produzieren, wie die bedienenden Mitarbeiter dies zulassen.

7. Literatur

[ACÉ96] Acél, P.: Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen – Effiziente Optimierung der diskreten Simulation. Dissertation ETH Zürich, Nr. 11459, 1996.

[BEC84] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover (1980), Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 70, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.

[BIC95] Bichler, K.; Schröter, N.: Praxisorientierte Logistik. Verlag W. Kohlhammer Stuttgart, Berlin, Köln, 1995.

[BRA87] Brankamp, K.: PPS- und CIM-Realisierungen zwischen Luftschlössern und Realität – Probleme-Fehler-Offene Fragen. Beitrag zum Kongress „PPS 87“, Böblingen, 1987.

[BRE01] Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen - Grundlagen und Anwendungen. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 571, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[CLA60] Clark, A. J.; Scarf, H.: Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. In: Management Science, Journal of the Institute of Management Sciences, Volume 6 (1960), The Institute of Management Sciences, Baltimore (Maryland), 1960, S. 475 – 490.

[CON67] Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.: Theory of scheduling. Addison-Wesley Publishing Company, Reading (MA), Palo Alto, London, Don Mills (Ontario), 1967.

[COR01] Corsten, H., Gössinger, R.: Advanced Planning Systems – Eine kritische Analyse aus planungsmethodischer Sicht. Schriften zum Produktionsmanagement Nr. 39, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2001.

[COR04] Corsten, H.: Produktionswirtschaft – Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 10., vollständig überarbeitete Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Wien, 2004.

[DIC09] Dickmann, P.: Dezentrale und schlanke Strukturen – *Gemba*-Orientierung. In: Dickmann, P. (Hrsg.): Schlanker Materialfluss – mit Lean Production, Kanban und Innovationen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2009, Kapitel 1.16, S. 86 – 92.

[DIN19226] DIN19226, Teil 1: Leittechnik - Regelungstechnik und Steuerungstechnik - Allgemeine Grundbegriffe. Februar 1994.

[DÖR99] Dörrsam, V.: Materialflussorientierte Leistungsanalyse einstufiger Produktionssysteme - Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1999.

[DOM88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 159, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988.

[EID91] Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor. 2., aktualisierte und erw. Auflage. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1991.

[ENN02] Enns, S. T.; Costa, M. P.: The effectiveness of input control based on aggregate versus bottleneck work loads. In: Production Planning & Control, Volume 13 (2002), Number 7. Taylor & Francis Group, London, 2002, S. 614 – 624.

[ERD84] Erdlenbruch, B.: Grundlagen neuer Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 71, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.

[EVE89] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 4, Fertigung und Montage. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1989.

[EVE96] Eversheim, W. (Hrsg.): Prozessorientierte Unternehmensorganisation - Konzepte und Methoden zur Gestaltung „schlanker“ Organisationen. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1996.

[EVE02] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 3, Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.

[FÄR07] Färber, B. H.: Simulationsansätze für Supply Chains – Grundlagen für eine Optimierung. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2007.

[FRI09] Friedli, T.; Scherrer-Rathje, M.: Die Zukunft der produzierenden Industrie an Hochlohnstandorten. In: io new management, Nr. 3, 2009. Axel Springer Schweiz Handelszeitung Fachverlag AG, Zürich, 2009, S. 14 - 17.

[GIL02] Gilland, W. G.: A simulation study comparing performance of CONWIP and bottleneck-based release rules. In: Production Planning & Control, Volume 13 (2002), Number 2. Taylor & Francis Group, London, 2002, S. 211 – 219.

[GOL84] Goldratt, E. M.; Cox, J..: The Goal - Excellence In Manufacturing. North River Press, New York, 1984.

[GUD07] Gudehus, T.: Logistik 1 – Grundlagen, Verfahren und Strategien. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2007.

[HAC89] Hackstein, R.: Produktionsplanung und –steuerung (PPS) - Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2., überarbeitete Auflage. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

[HAN06] Hansmann, K.-W.: Industrielles Management. 8., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Wien, 2006.

[HEI02] Heiserich, O.-E.: Logistik – Eine praxisorientierte Einführung. 3., überarbeitete Auflage. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 2002.

[HEI74] Heinemeyer, W.: Die Analyse der Fertigungsdurchlaufzeit im Industriebetrieb. Dissertation Technische Universität Hannover, 1974.

[HEL08] Helfrich, C.: Auftragsdurchsteuerung. In: Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 185 – 200.

[HOE07] Hoeschen, A.; Varianten, Preisdruck und Termine – Wie kann auch der Mittelstand den steigenden Anforderungen an Variantenvielfalt und Lieferzeiten gerecht werden? WZL/Fraunhofer Institut IPT und RWTH Aachen, Vortragsunterlagen zum Thema Produktionssysteme, Köln, 2007.

[HOP08a] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics. McGraw-Hill/Irwin, Boston (MA), 2008.

[HOP08b] Hopp, W. J.: Supply Chain Science. 3rd Edition. McGraw-Hill/Irwin, Boston (MA), 2008.

[JÖH67] Jöhnk, M. D.; Rubow, G.; Wetzel, W.: Stochastische Lagerbestandsplanung nach dem Bestellpunktverfahren. Physica Verlag, Würzburg, 1967.

[JUN07] Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Dissertation Universität Kassel, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007.

[KAI92] Kaiser, D.: Manufacturing Ressource Planning (MRP II). In: Kapoun, J. (Hrsg.): Produktionsplanungs- und –steuerungssysteme PPS – Manufacturing Ressource Planning (MRP II). Ausgewählte Vorträge, Projekte und Checklisten, Lausanne, 1992.

[KEM08] Kemmner, G.-A.: Handlungsempfehlungen zum Bestandsmanagement. In: Supply Chain Management, II/2008. IPM GmbH, Hannover, 2008, S. 49 - 52.

[KIN09] Kinkel, S.: Warum Firmen die Produktion in die Heimat zurückverlager. In: io new management, Nr. 3, 2009. Axel Springer Schweiz Handelszeitung Fachverlag AG, Zürich, 2009, S. 8 - 12.

[KLE09] Kleinert, A.; Sontow, K.: Auf PPS folgt MES – Feinplanung und –steuerung hat sich in der Praxis etabliert. In: Industrial Engineering, Fachzeitschrift des REFA-Verbandes, 3-2009. alpha print medien, Darmstadt, 2009, S. 12 - 22.

[KOE08] Koether, R.: Logistikaufgaben. In: Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 37 – 54.

[LÖD01] Lödding, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 587, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[LÖD08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2., erweiterte Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.

[LUC05] Luczak, H.; Meyer, M.: Zukünftige Herausforderungen in der PPS serienproduzierender Unternehmen. In: PPS Management, 2/2005. Gito mbH-Verlag, Berlin, 2005, S. 59 - 62.

[LUD92] Ludwig, E.; Nyhuis, P.: Verbesserung der Termineinhaltung in komplexen Fertigungsbereichen durch einen neuen Ansatz zur Plan-Durchlaufzeit-Ermittlung. In: Görke, W.; Rininsland, H.; Syrbe, M. (Hrsg.): Information als Produktionsfaktor. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992, S. 473 – 484.

[LUD95] Ludwig, E.: Modellgestützte Diagnose logistischer Produktionsabläufe. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 362, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.

[MAR98] Martin, C.: Produktionsregelung – ein modularer, modellbasierter Ansatz. Dissertation Technische Universität München, Forschungsberichte iwb, Nr. 113, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.

[MEY07] Meyer, J. C.; Wienholdt, H.: Wirtschaftliche Produktion in Hochlohnländern durch High Resolution SCM. In: Supply Chain Management, III/2007. IPM GmbH, Hannover, 2007, S. 23 - 27.

[MOR99] Moritz, A.: Verfahren zur simulationsgestützten Regelung der Kanban-Steuerung bei dynamischen Bedarfen. Dissertation RWTH Aachen (zugl. 1999), Diplomica GmbH, ID4515, Hamburg, 2001.

[NYH91] Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrössenbestimmung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 225, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

[NYH03] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien - Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003.

[OHN88] Ohno, T.: Toyota Production System. Beyond Large-Scale Production. Productivity Press, Cambridge (MA) and Norwalk (CT), 1988.

[PAP90] Pape, F. D.: Logistikgerechte PPS-Systeme - Konzeption, Aufbau, Umsetzung. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990.

[PAW07] Pawellek, G.: Produktionslogistik – Planung-Steuerung-Controlling. Carl Hanser Verlag, München, 2007.

[PLO85] Plossl, G. W.: Production and inventory control - Principles and techniques. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs (NJ), 1985.

[PET96] Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 193, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.

[PRE67] Pressler, G.: Regelungstechnik - I Grundelemente. 3., überarbeitete Auflage. Bibliographisches Institut, Hochschultaschenbücher-Verlag, Mannheim, 1967.

[RAY00] Raymond, L. S.: Effiziente Materialfluss-Steuerung mit Kanban und MRPII. Verlag Moderne Industrie AG, Landsberg/Lech, 2000.

[REI01] Reinsch, S.; Leupold, M.: Steuerung à la carte. In: phi, Ausgabe4/2001, Hannover, 2001, S. 12 – 13.

[REI02] Reinsch, S.: Verfahren der Logistik. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Logistikqualität. 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. 82 – 91.

[REI07] Reichwein, J.; Hochheimer, G.; Simic, D.: Messen, Regeln und Steuern - Grundoperationen der Prozessleittechnik. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.

[RÜC06] Rücker, T.: Optimale Materialflusssteuerung in heterogenen Produktionssystemen. Dissertation TU Ilmenau, Deutscher Universitäts-Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2006.

[SCH90] Scheel, J.: Erfolgsfaktor Ablauforganisation - Systematische Gestaltung, Auswahl und Bewertung von Fertigungsleitsystemen. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1990.

[SCH93] Schmidheiny, H.: Harmonisierung der Durchlaufzeiten - Ein neuer Ansatz für das Durchlaufzeit-Management der Fertigung kleiner und mittlerer Serien. Dissertation ETH Zürich, Nr. 10003, 1993.

[SCH01] Schotten, M.: Aachener PPS-Modell. In: Luczak, H.; Eversheim, W. (Hrsg.): Produktionsplanung und –steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. korr. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2001, S. 9 – 28.

[SCH03a] Schneider, M.; Grabe, D.: Weniger ist mehr – logistische Schlankheitskur im Flugzeugbau. In: phi, Ausgabe1/2003, Hannover, 2003, S. 16 – 17.

[SCH03b] Schultmann, F.: Stroffstrombasiertes Produktionsmanagement - Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme. Technological Economics, Band 58, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 2003.

[SCH04] Schneider, M.: Logistische Fertigungsbereichskennlinie. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 647, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.

[SCH05] Schulte, C.: Logistik – Wege zur Optimierung der Supply Chain. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 2005.

[SCH06] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2006, Kapitel 4.4, S. 745 – 780.

[SCH07] Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement – Operations und Supply Chain Management in umfassenden Wertschöpfunsnetzwerken. 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.

[SCH08] Schenk, M.; Wojanowski, R.: Fortschrittszahlen. In: Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 98 – 108.

[SHE08] Sheldon, D. H.: Lean Materials Planning and Execution – A Guide to Internal and External Supply Management Excellence. J. Ross Publishing, Fort Lauderale (FL), 2008.

[SPE90] Spearman, M. L.; Woodruff, D. L.; Hopp, W. J.: CONWIP – a pull alternative to kanban. In: International Journal of Production Research, Volume 28 (1990), Number 5, Taylor & Francis, London, New York, Philadelphia, 1990, S. 879 – 894.

[STA95] Staroske, U.: Die Drei-Sektoren-Hypothese - Darstellung und kritische Würdigung aus heutiger Sicht. Roderer Verlag, Regensburg, 1995.

[SUR98] Suri, R.: Quick Response Manufacturing – A Companywide Approach to Reducing Lead Times. Productivity Press, Portland (OR), 1998.

[SUR03] Suri, R.; Krishnamurthy, A.: How to Plan and Implement POLCA – A Material Control System for High-Variety or Custom-Engineered Products. In: Technical Report, Center for Quick Response Management, University of Wisconsin-Madison, Madison (WI), 2003, S. 1 – 17.

[VDI3633] VDI3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen – Grundlagen. März 2000.

[VDI5600] VDI5600, Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme – Manufacturing Execution Systems. Dezember 2007.

[WEB08] Weber, R.: Kanban-Einführung – Das effiziente, kundenorientierte Logistik- und Steuerungskonzept für Produktionsbetriebe. 6., neu bearbeitete Auflage. Expert Verlag, Renningen, 2008.

[WED89] Wedemeyer, von, H.-G..: Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung mit Hilfe der Simulation. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 176, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

[WES06] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.

[WIE87] Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Grundlagen, Verfahrens-aufbau, Realisierung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1987.

[WIE96] Wiendahl, H.-P.: Ausgewählte Strategien und Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management „Betriebshütte“ – Teil 2. 7., völlig neue bearbeitete Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1996, Kapitel 14, S. 83 – 113.

[WIE97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung - Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997.

[WIE03] Wiendahl, H.-P.; Schneider, M.; Begemann, C.: Wie aus der Logistik eine Wissenschaft wurde. In: Wiendahl, H.-P., Nickel, R., Heger, C., Winkler, H. (Hrsg.): Die wandlungsfähige Fabrik - Integrierte Sicht von Fabrikstruktur, Logistik und Produktionssystemen. Tagungsband zur IFA-Fachtagung 2003, 20.-21. März 2003, S. 107 – 142.

[WIE05] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 5., aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005.

[WIL09] Wilbert, F.: Flexible Produktion. In: Dickmann, P. (Hrsg.): Schlanker Materialfluss – mit Lean Production, Kanban und Innovationen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2009, Kapitel 1.5, S. 23 – 30.

[WIL89] Wildemann, H.: Flexible Werkstattsteuerung durch Integration von Kanban-Prinzipien. 2., unveränderte Auflage. gfmt – Gesellschaft für Management und Technologie-Verlags-KG, München, 1989.

[WIL01] Wildemann, H.: Das Just-In-Time Konzept - Produktion und Zulieferung auf Abruf. 5., neubearbeitete Auflage. TCW Transfer-Centrum-Verlag GmbH, München, 2001.

[WIN01] Windt, K.: Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 579, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[WOR03] Worbs, J.: Modellierung und Analyse turbulenter produktionslogistischer Prozesse mit Methoden der nichtlinearen Dynamik. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 644, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.

[YU01] Yu, K.-W.: Terminkennlinie - Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 576, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[ZIS07] Ziser, S.: Einsatz von Optimized Production Technology (OPT), Constant Work in Process (CONWIP) und Retrograde Terminierung (RT) in der Industrie und deren Vergleich. Studienarbeit, Archiv-Nr. V83982, Grin Verlag GmbH, München, 2007.

Jean Philippe Burkhalter

Dipl. Betr.- und Prod.-Ing. ETH

geb. 1974, diplomierte nach dem Grundstudium in Maschinenbau und Verfahrenstechnik am Departement für Betriebs- und Produktionswissenschaften mit Abschluss im Jahre 2002 auf den Fachgebieten Automatisierung, Logistik- und Informationsmanagement. Er promovierte 2010 berufsbegleitend an der ETH Zürich auf dem Gebiet der Produktionssteuerung und –regelung.

Seit Herbst 2002 ist Jean Philippe Burkhalter Projektleiter und Teilprojektleiter bei der Dr. Acél & Partner AG, eine international tätige Beratungsfirma für Logistik Management. Seine Spezialgebiete und die Schwerpunkte seiner Tätigkeiten lauten: ERP- und Prozessgestaltung mit Fokus auf Produktionssteuerungen, Fabrik- und Layoutplanung sowie dynamische Simulation mit statistischer Versuchsplanung.

Jean Philippe Burkhalter verfügt ausserdem über projekterprobte Erfahrungen auf den Gebieten Lean Production und Lean Thinking, KVP sowie Projektmanagement. Dabei bearbeitete er Umsetzungsprojekte in der Automobil-, Nahrungsmittel-, Handels- und Gesundheitsindustrie sowie im Dienstleistungssektor.

Jean Philippe Burkhalter hat mehrere Artikel für diverse Fachzeitschriften verfasst und war zusätzlich an verschiedenen Publikationen auf internationalen Kongressen beteiligt. Er dozierte an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Zudem hält er an der ETH Zürich Gastvorlesungen.