

# **Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christoph Koch

aus

Nürnberg

2018

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödning

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Oktober 2018



## **Wissen schafft Innovation**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg-Harburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 38:

Christoph Koch

Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger

1. Auflage

Hamburg 2018

ISSN 1613-8244

Copyright Christoph Koch 2018

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstgutachter Herrn Professor Lödding für die intensive Betreuung, die fachlichen Anregungen, die gewährten Freiräume und die stets unkomplizierte Kommunikation. Herrn Professor Thoben möchte ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danken. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Professor Ringle.

Allen ehemaligen Institutskollegen danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die freundschaftliche Zusammenarbeit. Im Besonderen danke ich Andreas Piontek für die fantastischen Jahre im gemeinsamen Büro und die zahlreichen Fachgespräche rund um die schönste Hauptsache der Welt. Zudem danke ich Martin Benter für seine motivierende Unterstützung in der Endphase der Erstellung dieser Arbeit und für seine erstklassigen Fähigkeiten als Schwimmlehrer. Friederike Engehausen danke ich für die wunderbare Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt. Ich bin froh, dass sich unsere Wege ein zweites Mal gekreuzt haben. Für zahlreiche angenehme Unterhaltungen bei gutem Kaffee danke ich Niklas Sikorra, von dessen Wissen ich oft profitieren durfte.

Mein großer Dank gilt darüber hinaus Herrn Dr. Axel Friedewald für seinen unermesslichen Einsatz für das Institut, der allen wissenschaftlichen Mitarbeitern, aber im Speziellen auch mir, zugutegekommen ist.

Aus dem Kreis der Studenten danke ich insbesondere Mike Klingbiel für die Unterstützung bei der Gestaltung und Umsetzung des Simulationsmodells.

Mein persönlicher Dank gilt meiner lieben Freundin Gesine Eich für ihre Unterstützung während der gesamten Promotionszeit – insbesondere in den schwierigen Phasen; meinen Eltern, Heike und Karl-Heinz Koch, und meinen Geschwistern, Caroline, Charlotte und Jonathan Koch, für ihren bedingungslosen Rückhalt, ihre liebevolle Zuneigung und dafür, dass sie mich zu dem gemacht haben, der ich bin. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Nürnberg  
im November 2018

Christoph Koch

**Inhaltsverzeichnis**

- 1 Einleitung .....1**
  - 1.1 Problemstellung ..... 1
  - 1.2 Zielsetzung .....2
  - 1.3 Aufbau der Arbeit ..... 2
- 2 Grundlagen und bestehende Ansätze .....5**
  - 2.1 Bevorratungsstrategien.....5
  - 2.2 Modellierung logistischer Zielgrößen .....7
    - 2.2.1 Bestand .....7
    - 2.2.2 Durchlaufzeit .....8
    - 2.2.3 Termintreue .....10
  - 2.3 Fertigungssteuerung .....12
    - 2.3.1 Einordnung in die PPS .....13
    - 2.3.2 Modell der Fertigungssteuerung.....14
    - 2.3.3 Auftragsfreigabe .....14
    - 2.3.4 Reihenfolgebildung .....16
    - 2.3.5 Kapazitätssteuerung .....18
  - 2.4 Die konventionelle Wertstrommethode .....19
    - 2.4.1 Wertstromanalyse.....19
    - 2.4.2 Wertstromdesign .....23
    - 2.4.3 Bewertung der Wertstrommethode .....25
    - 2.4.4 Wertstromdesign und Fertigungssteuerung: eine Analogiebetrachtung ....27
  - 2.5 Bestehende Ansätze zur Erweiterung der Wertstrommethode.....29
    - 2.5.1 Verfahren von Mike Rother .....29
    - 2.5.2 Improved VSM.....30
    - 2.5.3 Manufacture-to-order VSM.....31
    - 2.5.4 Job shop VSM.....32
    - 2.5.5 Value Network Mapping .....33
    - 2.5.6 Value Stream Engineering .....33
    - 2.5.7 Engineer-to-order VSM.....34
  - 2.6 Fazit .....35
    - 2.6.1 Zusammenfassung der Defizite .....35
    - 2.6.2 Anforderungen an eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger.....36
- 3 Wertstromanalyse für Auftragsfertiger .....39**

3.1 Ziele der Wertstromanalyse und Ableitung von Gestaltungsmerkmalen .....	39
3.2 Erläuterung des Vorgehens .....	40
3.2.1 Vorbereitung .....	41
3.2.2 Fertigungsrundgang .....	45
3.2.3 Datenintegration zur Wertstromkarte .....	60
3.2.4 Identifikation von Handlungsfeldern .....	62
3.3 Ansätze zur Aufwandsreduzierung .....	65
3.3.1 Softwareeinsatz zur Datenerfassung .....	65
3.3.2 Standardbogen zur Erstellung der Wertstromkarte .....	68
<b>4 Konfiguration des Wertstromdesigns .....</b>	<b>71</b>
4.1 Anforderungen an das Wertstromdesign .....	71
4.2 Vorgehen bei der Konfiguration .....	72
4.2.1 Auftragsannahme und -terminierung .....	73
4.2.2 Auftragsfreigabe .....	74
4.2.3 Reihenfolgebildung .....	76
4.2.4 Kapazitätssteuerung .....	78
4.3 Zusammenfassung .....	79
<b>5 Evaluierung der Konfiguration in der Simulation .....</b>	<b>81</b>
5.1 Simulationsmodell .....	81
5.2 Verifikation der Auftragsannahme und -terminierung .....	83
5.3 Versuchsplan .....	87
5.4 Evaluierung einer Referenzkonfiguration .....	88
5.4.1 Evaluierung der Reihenfolgebildung .....	89
5.4.2 Evaluierung der Auftragsfreigabe .....	93
5.4.3 Evaluierung der Kapazitätssteuerung .....	99
5.5 Gesamtfazit der Evaluierung .....	104
<b>6 Leitlinien und Umsetzung des Wertstromdesigns .....</b>	<b>105</b>
6.1 Leitlinien zur Erreichung des Soll-Zustands .....	105
6.1.1 Leitlinie 1: Bestimmen Sie verlässliche Termine für Ihre Aufträge .....	105
6.1.2 Leitlinie 2: Kontrollieren Sie den Zugang zur Fertigung durch eine Conwip-Steuerung .....	106
6.1.3 Leitlinie 3: Berücksichtigen Sie die Dringlichkeit eines Auftrags bei der Reihenfolgebildung .....	108
6.1.4 Leitlinie 4: Kommunizieren Sie den Plan-Abgang an alle Arbeitssysteme .....	109

6.1.5	Leitlinie 5: Beseitigen Sie Rückstände an den Arbeitssystemen durch eine systematische Rückstandsregelung .....	110
6.2	Umsetzung des Soll-Zustands .....	112
6.3	Grenzbedingungen des Wertstromdesigns .....	118
6.3.1	Grenzbedingung der Conwip-Steuerung .....	118
6.3.2	Grenzbedingungen für die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin ....	119
6.3.3	Grenzbedingung für die Rückstandsregelung .....	120
<b>7</b>	<b>Evaluierung in der Praxis.....</b>	<b>121</b>
7.1	Ziele und Überblick.....	121
7.2	Vergleich mit Rückmeldedaten.....	122
7.2.1	Evaluationskriterien .....	122
7.2.2	Notwendige Rückmeldedaten .....	123
7.2.3	Vergleich mit Rückmeldedaten .....	124
7.3	Fallstudie 1 .....	125
7.3.1	Beschreibung des Betrachtungsbereichs .....	125
7.3.2	Anwendung der Wertstromanalyse .....	126
7.3.3	Vergleich mit Rückmeldedaten .....	132
7.3.4	Anwendung des Wertstromdesigns für Auftragsfertiger .....	135
7.3.5	Kritische Würdigung des Fallbeispiels .....	138
7.4	Fallstudie 2.....	139
7.4.1	Beschreibung des Betrachtungsbereichs .....	139
7.4.2	Anwendung der Wertstromanalyse .....	139
7.4.3	Vergleich mit Rückmeldedaten .....	145
7.4.4	Anwendung des Wertstromdesigns für Auftragsfertiger .....	149
7.4.5	Kritische Würdigung des Fallbeispiels .....	152
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung .....</b>	<b>153</b>
8.1	Zusammenfassung.....	153
8.2	Ausblick .....	154
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>163</b>

**Indices**

<i>allg.</i>	:	<i>allgemein</i>
<i>AS</i>	:	<i>arbeitssystemspezifisch</i>
<i>i</i>	:	<i>einzelner Auftrag / Klasse</i>
<i>Ist</i>	:	<i>Ist</i>
<i>m</i>	:	<i>Mittel</i>
<i>OG</i>	:	<i>oberer Grenzwert</i>
<i>Plan</i>	:	<i>Plan</i>
<i>UG</i>	:	<i>unterer Grenzwert</i>
<i>RA</i>	:	<i>bedingt durch Reihenfolgeabweichung</i>
<i>RS</i>	:	<i>rückstandsbedingt</i>
<i>(T)</i>	:	<i>zum Zeitpunkt T</i>
<i>vir</i>	:	<i>virtuell</i>

**Verzeichnis der Formelzeichen**

<i>AnzAuf</i>	:	<i>Anzahl Aufträge [-]</i>
<i>AB</i>	:	<i>Abgang [Std]</i>
<i>B</i>	:	<i>Bestand [Std]</i>
<i>BA</i>	:	<i>Bestand in Anzahl Aufträge [-]</i>
<i>L</i>	:	<i>Leistung [Std/BKT]</i>
<i>LA</i>	:	<i>Leistung in Anzahl Aufträge [1/BKT]</i>
<i>m</i>	:	<i>Anzahl paralleler Stationen am Arbeitssystem [-]</i>
<i>N</i>	:	<i>Anzahl an Aufträgen im System [-]</i>
<i>PR</i>	:	<i>Prioritätsrang des Auftrags [Std]</i>
<i>R</i>	:	<i>Reichweite [BKT]</i>
<i>RA</i>	:	<i>Reihenfolgeabweichung [Std]</i>
<i>RS</i>	:	<i>Rückstand [Std]</i>
<i>TAA</i>	:	<i>Terminabweichung im Abgang [BKT]</i>
<i>TAB</i>	:	<i>Bearbeitungsbeginn des Auftrags [BKT]</i>
<i>TAE</i>	:	<i>Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]</i>
<i>TT</i>	:	<i>Terminreue [%]</i>
<i>z</i>	:	<i>Anzahl der Zeitabschnitte im Betrachtungszeitraum [-]</i>
<i>ZDL</i>	:	<i>Durchlaufzeit [BKT]</i>
$\lambda$	:	<i>Ankunftsrate [1/BKT]</i>

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1-1: Aufbau der Arbeit ..... 3

Abb. 2-1: Vergleich von Bevorratungsstrategien i.A. [Wien11, S. 282]..... 5

Abb. 2-2: Aufgaben im Aachener PPS-Modell [Lucz98, S. 16] ..... 13

Abb. 2-3: Ein Modell der Fertigungssteuerung [Lödd16, S. 8] ..... 14

Abb. 2-4: Beispielhafte Darstellung des Ist-Zustands [Roth04, S. 27] ..... 22

Abb. 2-5: Beispielhafte Darstellung des Soll-Wertstroms i.A. [Rother08, S. 72f.] ..... 24

Abb. 2-6: Methoden des klassischen Wertstromdesigns ..... 26

Abb. 2-7: Maßnahmen zur Wertstromverbesserung in der Auftragsfertigung [Roth05, S. 2]..... 30

Abb. 2-8: Zielbereich der entwickelten Methode ..... 36

Abb. 3-1: Vierstufiges Vorgehen in der Wertstromanalyse ..... 41

Abb. 3-2: Beispielhafte Produkt-Arbeitssystem-Matrix ..... 45

Abb. 3-3: Notwendige Arbeitssystemdaten ..... 47

Abb. 3-4: Bestandsorte mit Symbolik an einem beispielhaften Arbeitssystem ..... 48

Abb. 3-5: Darstellung des Bestands in der Wertstromkarte ..... 49

Abb. 3-6: Prozess mit Bestandsdreieck und Zeitgrößen ..... 51

Abb. 3-7: Auftragsliste mit Plan-Rängen ..... 51

Abb. 3-8: Arbeitssystem mit Plan-Rängen der Aufträge in Bearbeitung ..... 52

Abb. 3-9: Diagramm zur Veranschaulichung der Reihenfolgedisziplin ..... 53

Abb. 3-10: Verteilung der verbleibenden Durchlaufzeiten ..... 55

Abb. 3-11: Diagramm zur Schätzung der mittleren Terminabweichung am Beispiel-Arbeitssystem..... 56

Abb. 3-12: Darstellung der Terminabweichung aus Rückstand..... 57

Abb. 3-13: Darstellung der Planungsinformationen ..... 59

Abb. 3-14: Darstellung der Steuerungsinformationen ..... 60

Abb. 3-15: Datenintegration zur Wertstromkarte..... 62

Abb. 3-16: Auftragsfreigabe und erstes Arbeitssystem..... 63

Abb. 3-17: Reihenfolgebildung an einem Arbeitssystem ..... 64

Abb. 3-18: Fehlende Kommunikation und unzureichende Kapazitätssteuerung ..... 65

Abb. 3-19: Benutzeroberfläche der Tablet-Applikation zur Erfassung von Auftragsdaten ..... 67

Abb. 3-20: Standardbogen für eine vereinfachte Datenintegration ..... 69

Abb. 5-1: Aufbau des Simulationsmodells ..... 81

Abb. 5-2: Terminabweichung der Aufträge für Versuch 1 (FIFO)..... 90

Abb. 5-3: Terminabweichung der Aufträge für Versuch 2 (FPE)..... 91

Abb. 5-4: Terminabweichung im Abgang für Versuch 3 (FIFO) ..... 92

Abb. 5-5: Terminabweichung im Abgang bei Versuch 4 (FPE)..... 92

Abb. 5-6: Terminabweichung im Abgang für Versuch 5 (Auftragsfreigabe nach Termin, FIFO-Reihenfolgebildung)..... 95

Abb. 5-7: Terminabweichung im Abgang für Versuch 6 (Conwip-Freigabe, FIFO-Reihenfolgebildung)..... 96

Abb. 5-8: Durchlaufdiagramm Versuch 7 (Auftragsfreigabe nach Termin, Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin) ..... 97

Abb. 5-9: Durchlaufdiagramm Versuch 8 (30 Conwip Karten, Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin). 98

Abb. 5-10: Terminabweichung für Versuch 8 (ohne Rückstandsregelung) ..... 101

Abb. 5-11: Terminabweichung für Versuch 9 (mit Rückstandsregelung) ..... 101

Abb. 5-12: Terminabweichung für Versuch 10 (ohne Rückstandsregelung) ..... 102

Abb. 5-13: Terminabweichung für Versuch 11 (mit Rückstandsregelung) ..... 103

Abb. 6-1: Darstellung der Vorgangstermine in der Wertstromkarte..... 106

Abb. 6-2: Funktionsweise der Conwip-Steuerung..... 107

## Abbildungsverzeichnis

---

Abb. 6-3: Darstellung und Symbole der Conwip-Steuerung .....	108
Abb. 6-4: Darstellung Reihenfolgebildung nach Termin.....	109
Abb. 6-5: Informationsfluss für den Plan-Abgang .....	110
Abb. 6-6: Prinzip der Rückstandsregelung i.A. [Lödd16, S. 553].....	111
Abb. 6-7: Darstellung Rückstandsregelung in der Wertstromkarte .....	112
Abb. 6-8: Verlauf von Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinien i.A. [Nyhu12, S. 84] .....	114
Abb. 6-9: Hilfsmittel zur Umsetzung der Conwip-Steuerung .....	114
Abb. 6-10: Hilfsmittel zur Reihenfolgebildung an Arbeitssystemen [Lödd16, S. 526].....	115
Abb. 6-11: Beispielhafte Kapazitätshüllkurven für ein Arbeitssystem [Brei01, S. 77] .....	116
Abb. 6-12: Monitor zur Darstellung des Plan- und Ist-Abgangs an einem Arbeitssystem .....	117
Abb. 7-1: Histogramm mit kumulierter Häufigkeit .....	125
Abb. 7-2: Groblayout des betrachteten Bereichs .....	126
Abb. 7-3: Geschätzte Terminabweichung für das Arbeitssystem „Kontrolle“.....	128
Abb. 7-4: Reihenfolgedisziplin in der Fertigung .....	129
Abb. 7-5: Wertstromkarte des Fallbeispiels.....	130
Abb. 7-6: Terminabweichung im Abgang der Aufträge.....	132
Abb. 7-7: Vergleich von gemessenem und in der Fertigung gezähltem Bestand.....	133
Abb. 7-8: Darstellung des Soll-Zustands der Fertigung .....	137
Abb. 7-9: Geschätzte Terminabweichung für das Arbeitssystem „Schleifen“.....	141
Abb. 7-10: Reihenfolgedisziplin Anwendungsbeispiel 2.....	142
Abb. 7-11: Wertstromkarte des Fallbeispiels.....	143
Abb. 7-12: Terminabweichung im Abgang der Aufträge.....	145
Abb. 7-13: Vergleich von gemessenem und in der Fertigung gezähltem Bestand.....	146
Abb. 7-14: Auswertung der Reihenfolgedisziplin .....	148
Abb. 7-15: Darstellung des Soll-Zustands der Fertigung .....	151



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

An Hochlohnstandorten wie Deutschland sind Unternehmen, die sich im globalen Wettbewerb befinden, besonders abhängig von leistungsfähigen Produkten und Prozessen. Indikatoren für die Produkt- und Prozessqualität sind die Anzahl der Kundenreklamationen und die Liefertreue. Beide Größen sind nachweisbar verantwortlich für den Erfolg eines Unternehmens, da Unternehmen mit einer hohen Liefertreue und wenig Reklamationen profitabler agieren und schneller wachsen als Unternehmen mit Handlungsbedarf in diesen Bereichen [VDMA14, S. 24]. Ein Unternehmen kann durch eine hohe Termintreue in den internen Prozessen die Grundvoraussetzung für eine hohe Liefertreue zum Kunden legen. Die Bedeutung der Termintreue ist den meisten Unternehmen bewusst. So geben die mit Abstand meisten der an einer Studie zum Thema Industrie 4.0 teilnehmenden Unternehmen an, dass die Termintreue die wichtigste logistische Zielgröße ist [Nyhu16, S. 9].

Für eine hohe Termintreue in der Fertigung ist es notwendig, Reihenfolgeabweichungen bei der Auswahl von Fertigungsaufträgen und Rückstände an Arbeitssystemen zu vermeiden (vgl. [Yu01]; [Kuyu13]; [Lödd12]). Es gelingt den meisten Unternehmen nicht, diese in der Theorie bekannten Zusammenhänge in die Praxis zu überführen, sodass als Ergebnis die Termintreue häufig mangelhaft ist.

Um die Logistikleistung zu verbessern und die internen Kosten zu reduzieren, hat der Gedanke des Lean Manufacturing in vielen Unternehmen Einzug erhalten. Eines der Kernwerkzeuge und in der Industrie besonders weit verbreiteter Ansatz ist die Wertstrommethode. Mit ihr lassen sich die Material- und Informationsflüsse eines Unternehmens standardisiert darstellen und ein Zielzustand ableiten (vgl. [Roth04]; [Erla07]; [Jone03]). Für den Anwender stehen aus logistischer Sicht die Zielgrößen Durchlaufzeit und Termintreue im Fokus [Spat10, S. 44]. Die Methode stammt jedoch ursprünglich aus der Großserienfertigung von Toyota und wurde dort als Kommunikationsstandard etabliert. Die Methode ist daher an die Anforderungen und Gegebenheiten der Großserienfertigung auf Lager angepasst. So fehlt die Aufnahme der Termintreue als logistische Zielgröße des Verfahrens. Entsprechend existieren auch keine Designleitlinien, um die Termintreue ausdrücklich zu unterstützen. Zudem kann die Wertstrommethode in ihrer derzeitigen Form eine hohe Produktvarianz und damit auch komplexere Materialflüsse nur schwerlich abbilden. Es fehlt eine Wertstrommethode, die in der Lage ist, die Termintreue zu analysieren und zu verbessern und die zudem auch bei hoher Produktvarianz und komplexen Materialflüssen durchführbar ist.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der es möglich ist, die Material- und Informationsflüsse einer Auftragsfertigung in einem standardisierten Vorgehen aufzunehmen, den Handlungsbedarf für die Material- und Informationsflussgestaltung abzuleiten und einen Zielzustand zu entwickeln. Die Methode beinhaltet daher folgende Teilziele:

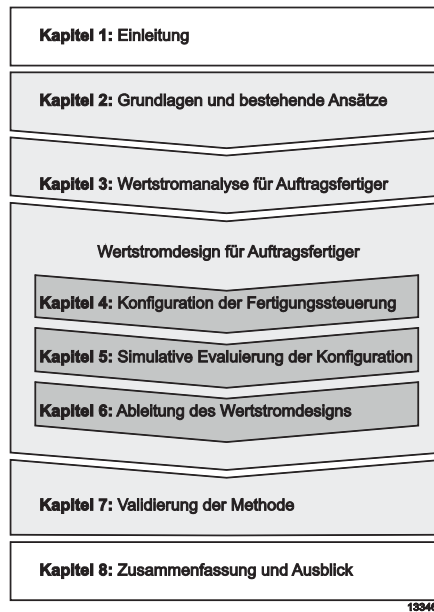
1. *Entwicklung einer Methodik zur Durchführung einer Wertstromanalyse in der Auftragsfertigung:* Ziel ist es, eine Methodik für die Wertstromanalyse in der Auftragsfertigung zu entwickeln, die es ermöglicht, die logistische Zielerreichung inklusive der Termintreue in der Fertigung zu erfassen und Schwachstellen aufzuzeigen. Das Vorgehen soll die besonderen Rahmenbedingungen der Auftragsfertigung, wie bspw. die große Produktvarianz, berücksichtigen und zudem nur geringen Zeitaufwand erfordern.
2. *Entwicklung von Wertstromdesignleitlinien für Auftragsfertiger:* Ziel ist es, ein Wertstromdesign zu entwickeln, das sich durch eine gute Umsetzbarkeit und einfache Maßnahmen auszeichnet. Die Maßnahmen sollen einen messbaren Effekt auf alle logistischen Zielgrößen eines Auftragsfertigers besitzen. Das Design soll so gestaltet sein, dass der Anwender dazu befähigt wird, auch ohne Expertenwissen seine Fertigung zu verbessern.

Beide Teilziele sollen – ähnlich wie das Verfahren von Rother und Shook in der Lagerfertigung (vgl. [Roth04]) – als Standard in der Auftragsfertigung etabliert werden.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Abb. 1-1 fasst den Aufbau der Arbeit zusammen. Als Grundlage dieser Arbeit differenziert Kapitel 2 zunächst verschiedenen Bevorratungsstrategien, erläutert die Modellierung logistischer Zielgrößen und nennt bestehende Ansätze der Wertstrommethode. Es stellt Defizite dieser Ansätze heraus und leitet Anforderungen an eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger ab.

Die Entwicklung der Wertstrommethode für Auftragsfertiger ist Gegenstand der Kapitel 3 bis 6. Zunächst befasst sich Kapitel 3 mit der Wertstromanalyse für Auftragsfertiger. Es stellt ein vierstufiges Vorgehen zur Wertstromanalyse vor und stellt Ansätze zur Aufwandsreduzierung bereit.



**Abb. 1-1:** Aufbau der Arbeit

Die Kapitel 4 bis 6 befassen sich mit dem Wertstromdesign und sind an den Problemlösungszyklus von Haberfellner et al. angelehnt (vgl. [Habe12, S. 74]). Kapitel 4 stellt zunächst die Herausforderungen in der Auftragsfertigung dar und entwirft Lösungsvarianten für die Aufgaben der Fertigungssteuerung. Kapitel 5 analysiert und bewertet die Lösungen, indem mit Hilfe eines Simulationsmodells eine Referenzkonfiguration ermittelt wird. Aufbauend darauf erarbeitet Kapitel 6 Leitlinien für das Wertstromdesign, gibt Hinweise zu ihrer Umsetzung und nennt Grenzbedingungen für den Einsatz der Leitlinien.

Im Anschluss an die Konzeptphase der Arbeit folgen in Kapitel 7 Anwendungsbeispiele für die Gesamtmethodik. Ihre Auswertung zielt insbesondere darauf ab, die Praxistauglichkeit der Wertstrommethode zu belegen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8.



## 2 Grundlagen und bestehende Ansätze

Dieses Kapitel stellt die für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen dar. Dafür definiert Abschnitt 2.1 zunächst die üblichen Bevorratungsstrategien und beschreibt im Detail die Besonderheiten der Auftragsfertigung. Abschnitt 2.2 stellt die wesentlichen Modellierungserkenntnisse für logistische Zielgrößen dar. Abschnitt 2.3 beschreibt die Grundlagen der Fertigungssteuerung. Anschließend diskutieren die Abschnitte 2.4 und 2.5 die konventionelle Wertstrommethode und ihre bestehenden Erweiterungen. Abschnitt 2.6 fasst deren Defizite zusammen und leitet Anforderungen an eine neue Methode ab.

### 2.1 Bevorratungsstrategien

Die Bevorratungsstrategie, in der Literatur zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) auch häufig als Auftragsauslösungsart oder Auftragsabwicklungstyp bezeichnet, legt fest, an welcher Stelle im Auftragsdurchlauf der Markt von der Produktion entkoppelt ist. Die beiden Extremtypen sind die Lagerfertigung und die Auftragsfertigung. Zwischen diesen beiden Typen bewegen sich Mischformen wie etwa die auftragsbezogene Montage. Die Bevorratungsstrategie wird maßgeblich durch die Lieferzeitanforderungen des Marktes bestimmt, aber auch der Produktwert und die Bedarfsrate sind Einflusskriterien auf die Wahl der Bevorratungsstrategie [Wien11, S. 283]. Übersteigen die Durchlaufzeiten die geforderten Lieferzeiten des Kunden, so ist eine Entkopplung über ein Lager notwendig (vgl. Abb. 2-1).

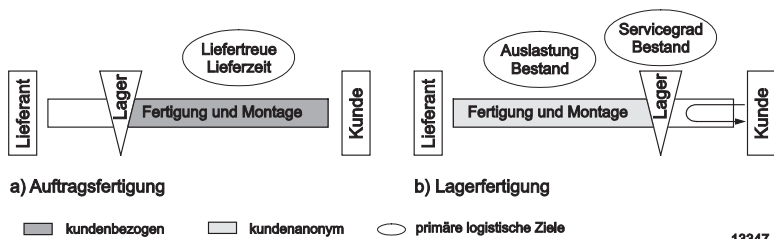


Abb. 2-1: Vergleich von Bevorratungsstrategien i.A. [Wien11, S. 282]

Beide Bevorratungsstrategien unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Merkmale (vgl. [Lucz98, S. 76ff.]). Die für diese Arbeit wesentlichen Merkmale sind:

- Art der Auftragsauslösung
- Erzeugnisspektrum
- Fertigungsart

- Fertigungsprinzip
- Logistische Zielgrößen

### **Auftragsauslösung**

In der Auftragsfertigung erzeugt ein eingehender Kundenauftrag einen Fertigungsauftrag. Im Fall eines einstufigen Produkts wird ein Kundenauftrag unmittelbar in einen Fertigungsauftrag umgewandelt, was insbesondere bei kundenspezifischen Produkten der Fall ist [Lödd16, S. 167]. In der Lagerfertigung bestimmt häufig der Fertigwarenbestand die Auftragsauslösung.

### **Erzeugnisspektrum**

Das Erzeugnisspektrum gibt an, wie groß der Einfluss des Kunden auf die Gestaltung des Erzeugnisses oder Produktes ist. Häufig legen in der Auftragsfertigung die Kundenanforderungen die Erzeugniskonstruktion nahezu vollständig fest, sodass jeder Kundenauftrag eine Neukonstruktion bedeutet. Alternativ, wenn auf einer Grundkonstruktion aufgebaut werden kann, werden die individuellen Komponenten gefertigt [Lucz98, S. 94]. In der Produktion auf Lager liegen Standarderzeugnisse vor, die der Kunde nicht mehr individuell gestalten kann. Beispiele hierfür sind Kameras, Haushaltsgeräte und Drucker [Wien08, S. 255].

### **Fertigungsart**

Die Fertigungsart unterscheidet sich je nach produzierter Menge eines Erzeugnisses. Als Kennzahl dient bspw. die Wiederholhäufigkeit des Erzeugnisses. In der Auftragsfertigung ist die Fertigungsart entweder eine Einmalfertigung oder eine Einzel- und Kleinserienfertigung [Lucz98, S. 94], während die Lagerfertigung die kundenanonymen Produkte häufig in hoher Stückzahl herstellen kann [Lucz98, S. 134].

### **Fertigungsprinzip**

Das Fertigungsprinzip charakterisiert die räumliche Anordnung der Betriebsmittel, die Zuordnung von Mitarbeitern und den Materialfluss durch die Fertigung [Wien08, S. 29]. Da in der Auftragsfertigung kundenindividuelle Produkte hergestellt werden, findet der Ablauf der Fertigung und Montage meist in Form einer Werkstatt- oder Inselfertigung bzw. in Form einer Baustellen- oder Gruppenmontage statt. In jedem Fall muss ein ungeordneter Materialfluss koordiniert werden und die Fertigung besitzt aufgrund der Produktkomplexität eine große Anzahl aufeinander folgender Arbeitsgänge [Schu14, S. 37]. Da die Erzeugnisse in der Lagerfertigung häufig in Serien- oder Massenfertigung produziert werden, lohnt sich hier die Einrichtung einer Fließfertigung bzw. Fließmontage.

## **Logistische Zielgrößen**

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Auftrags- und Lagerfertigung sind die logistischen Zielgrößen, die jeweils im Fokus stehen. In der Auftragsfertigung ist der Kunde direkt von der Nichteinhaltung von Lieferzeiten und Lieferterminen betroffen. Der Fokus liegt daher auf diesen Größen. Die Lieferzeit ist nach unten durch die Durchlaufzeit der Produktion begrenzt, meist ist sie über einen zusätzlichen Lieferzeitpuffer entkoppelt. Die interne Durchlaufzeit ist daher in der Auftragsfertigung von großer Bedeutung. Grundlage einer hohen Liefertreue ist eine hohe interne Termintreue [Lödd12, S. 1]. In der Lagerfertigung sollen möglichst alle Kundennachfragen direkt ab Lager bedient werden können, sodass der Servicegrad eine besondere Bedeutung hat. Intern liegt der Fokus auf einer hohen Auslastung der Arbeitssysteme oder auf einem niedrigen Umlaufbestand [Wien11, S. 282].

## **2.2 Modellierung logistischer Zielgrößen**

Dieser Abschnitt beinhaltet Definitionen und Zusammenhänge, die für die Erstellung einer neuen Wertstrommethode für Auftragsfertiger notwendig sind. Dies umfasst die Modellierungsgrundlagen der logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue.

### **2.2.1 Bestand**

Beständen kommt aus produktionslogistischer Sicht aus mehreren Gründen Bedeutung zu [Lödd08, S. 33]: Bestände führen zum einen zu Kapitalbindung und sind somit eine direkte Zielgröße, die es zu minimieren gilt. Andererseits haben Bestände einen unmittelbaren Einfluss auf die Durchlaufzeit einer Fertigung, da bei hohen Beständen Aufträge an den Arbeitssystemen auf Warteschlangen treffen [Wien97, S. 4].

Es kann grundsätzlich zwischen verschiedenen physischen Beständen unterschieden werden. Zum einen existieren Lagerbestände, die wiederum in Rohmaterialien, Halbfabrikate und Erzeugnisse unterteilt werden können. Zum anderen existieren zwischen den Lagerpunkten Umlaufbestände. Als Umlaufbestand gelten alle Produktionssaufträge, die freigegeben und noch nicht abgeschlossen sind [Hopp08, S. 230; Wien97, S.222]. Der Umlaufbestand kann für die gesamte Fertigung, einen ausgewählten Bereich oder für ein einzelnes Arbeitssystem bestimmt werden. Er kann in Stück gemessen werden, da aber insbesondere in der Auftragsfertigung die verschiedenen Aufträge stark schwankende Auftragsinhalte besitzen, wird der Bestand alternativ in den Auftragszeiten gemessen [Nyhu12, S. 18].

In der industriellen Praxis hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Dokumentation der Fertigstellung von Aufträgen an Arbeitssystemen in diskreten Zeitabschnitten vorzunehmen (bspw. tagesweise). Mit der Rückmeldung verlässt der Auftrag das System und wird dem nachfolgenden System zugeschrieben. Ein mittlerer Bestand kann dann gemessen werden, indem die Bestandssumme verschiedener diskreter Zeitabschnitte durch die Anzahl der Zeitabschnitte geteilt wird [Nyh12, S. 28]:

$$B_m = \frac{\sum_{T=T_0}^{T_1} B(T)}{z} \quad 2-1$$

- $B_M$  : mittlerer Bestand [Std]  
 $B(T)$  : Bestand im Zeitabschnitt  $T$  [Std]  
 $z$  : Anzahl der Zeitabschnitte im Betrachtungszeitraum [-]

### 2.2.2 Durchlaufzeit

Für die Modellierung der Durchlaufzeit bestehen verschiedene grundlegende Modelle. Zwei besonders weit verbreitete Modelle sind Littles Gesetz, das insbesondere in der Warteschlangentheorie Verwendung findet, und das Hannoveraner Trichtermodell.

#### Littles Gesetz

Ein Modell zur Bestimmung von Durchlaufzeiten ist Littles Gesetz, das ursprünglich zur Modellierung von Warteschlangen diente. Dieses Gesetz besagt, dass die mittlere Durchlaufzeit eines Systems dem Produkt aus der mittleren Anzahl der Aufträge am System und der der mittleren Zwischenankunftszeit von Aufträgen entspricht. Wird die mittlere Zwischenankunftszeit durch die mittlere Ankunftsrate ersetzt, ergibt sich der folgende Zusammenhang [Conw67, S. 19]:

$$F_m = \frac{N_m}{\lambda} \quad 2-2$$

- $F_m$  : mittlere Durchlaufzeit [BKT]  
 $N_m$  : mittlere Anzahl an Aufträgen im System [-]  
 $\lambda$  : Ankunftsrate [1/BKT]

Conway definiert weiterhin die mittlere Leistung einer Arbeitsstation als [Conw67, S. 20]:

$$U_m = \frac{\lambda \cdot p_m}{m} \quad 2-3$$

- $U_m$  : mittlere Leistung [Std/BKT]  
 $\lambda$  : Ankunftsrate [1/BKT]

- $p_m$  : mittlere Auftragszeit [Std]  
 $m$  : Anzahl paralleler Stationen am Arbeitssystem [-]

Stellt man Gleichung 2-3 nach der Ankunftsrate um und setzt diese dann in Gleichung 2-2 ein, erhält man folgenden Zusammenhang:

$$F_m = \frac{N_m \cdot p_m}{m \cdot U_m} \quad 2-4$$

- $F_m$  : mittlere Durchlaufzeit [BKT]  
 $N_m$  : mittlere Anzahl an Aufträgen im System [-]  
 $p_m$  : mittlere Auftragszeit [Std]  
 $m$  : Anzahl paralleler Stationen am Arbeitssystem [-]  
 $U_m$  : mittlere Leistung der Arbeitsstation [Std/BKT]

Nyhuis greift diese Modellierung auf und ersetzt die Variable  $F_m$  durch die mittlere virtuelle Durchlaufzeit ( $ZDL_{vir}$ ). Virtuell aus dem Grund, da es keinem arithmetischen Mittel aus mehreren einzelnen Durchlaufzeiten entspricht, sondern aus dem Produkt verschiedener Mittelwerte gebildet wird. Auch die anderen Variablen werden in eine neue Nomenklatur überführt, um einen Vergleich mit der Trichterformel zu ermöglichen. Die mittlere Leistung eines Arbeitssystems ergibt sich aus dem Produkt der Leistung einer Arbeitsstation und der Anzahl der parallelen Stationen an dem Arbeitssystem. Wird zusätzlich die mittlere Leistung (in [Std/BKT]) durch das Produkt aus mittlerer Auftragszeit und der mittleren Anzahl fertiggestellter Aufträge pro Betriebskalendertag ersetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang [Nyhuis, S. 32ff.]:

$$ZDL_{vir} = \frac{BA_m}{LA_m} \quad 2-5$$

- $ZDF_{vir}$  : mittlere virtuelle Durchlaufzeit [BKT]  
 $BA_m$  : mittlerer Bestand in Anzahl Aufträge am Arbeitssystem [-]  
 $LA_m$  : mittlere Leistung in Anzahl Aufträge [1/BKT]

### Trichtermodell

Das Trichtermodell lässt sich in einer zentralen Formel zusammenfassen, welche die mittlere Reichweite eines Arbeitssystems in Abhängigkeit von mittlerem Bestand und mittlerer Leistung angibt [Wien97, S. 92]:

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad 2-6$$

- $R_m$  : mittlere Reichweite [BKT]  
 $B_m$  : mittlerer Bestand am Arbeitssystem [Std]  
 $L_m$  : mittlere Leistung des Arbeitssystems [Std/BKT]

Bei einer homogenen Auftragszeitstruktur oder einer im Vergleich zur Durchlaufzeit sehr niedrigen Durchführungszeit entspricht die mittlere Durchlaufzeit etwa der Reichweite [Nyhu12, S. 86]:

$$ZDL_m \cong \frac{B_m}{L_m} \quad 2-7$$

- $ZDL_m$  : mittlere Durchlaufzeit [BKT]  
 $B_m$  : mittlerer Bestand am Arbeitssystem [Std]  
 $L_m$  : mittlere Leistung des Arbeitssystems [Std/BKT]

### 2.2.3 Termintreue

Die Termintreue gibt den prozentualen Anteil der termintreu gefertigten Aufträge wider. Es gilt [Lödd16, S. 34]:

$$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TAA_{UG} \leq TAA \leq TAA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad 2-8$$

- $TT$  : Termintreue [%]  
 $\text{AnzAuf}$  : Anzahl Aufträge [-]  
 $TAA_{UG}$  : Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]  
 $TAA_{OG}$  : Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

Um die Termintreue zu bestimmen, muss zunächst die Terminabweichung gemessen werden. Die Terminabweichung entsteht aus der Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Bearbeitungsende eines Auftrags [Domb88, S. 49].

$$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan} \quad 2-9$$

- $TAA$  : Terminabweichung im Abgang [BKT]  
 $TAE_{Ist}$  : Ist-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]  
 $TAE_{Plan}$  : Plan-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]

Nach Kuyumcu lässt sich die Terminabweichung in ihre Bestandteile Terminabweichung aus Rückstand und Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung zerlegen [Kuyu-13, S. 36ff.].

### Terminabweichung aus Rückstand

Der Rückstand ist die Abweichung des tatsächlichen Abgangs vom geplanten Abgang einer Fertigung oder eines einzelnen Arbeitssystems. Maschinen- und Personalausfälle oder eine unrealistische Planung können bspw. Rückstand verursachen. Petermann hat den Rückstand als Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Abgang zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert [Pete96, S. 104].

$$RS(t) = AB_{Plan}(t) - AB_{Ist}(t) \quad 2-10$$

$RS$  : Rückstand [Std]  
 $AB_{Ist}$  : Ist-Abgang [Std]  
 $AB_{Plan}$  : Plan-Abgang [Std]

Der Rückstand kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Hat das betrachtete Arbeitssystem oder die Fertigung einen höheren Abgang erreicht als geplant, bedeutet dies einen negativen Rückstand. Der Quotient aus Rückstand und Leistung entspricht der rückstandsbedingten Terminabweichung [Yu01, S. 41] [Kuyu13, S 46]:

$$TAA_{m, RS} = \frac{RS_m}{L_m} \quad 2-11$$

$TAA_{m, RS}$  : mittlere Abgangsterminabweichung aus Rückstand [BKT]  
 $RS_m$  : mittlerer Rückstand [Std]  
 $L_m$  : mittlere Leistung [Std/BKT]

### Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung

Auch an rückstandsfreien Arbeitssystemen können Terminabweichungen entstehen. Dies ist immer dann der Fall, wenn nicht dringende Aufträge vorgezogen werden und dafür dringende Aufträge zurückgestellt werden. Die zweite Einflussgröße auf die Terminabweichung ist somit die Reihenfolgeabweichung. Um die Reihenfolgeabweichung zu ermitteln, wird eine erweiterte Auftragsliste erstellt, die Plan- und Ist-Endtermine, Plan- und Ist-Ränge sowie die resultierende Reihenfolgeabweichung enthält (Tabelle 1) [Kuyu13, S 40; Lödd16, S. 86].

**Tabelle 1:** Auftragsliste mit Plan-Rang, Ist-Rang und Reihenfolgeabweichung

1	2	3	4	5	6	7 = 6 - 5
Nr.	TAE <sub>Ist</sub> [BKT]	TAE <sub>Plan</sub> [BKT]	ZAU [Std]	Plan-Rang [Std]	Ist-Rang [Std]	Reihenfolge- abweichung [Std]
1	206	191	0,5	15,9	0,5	-15,4
2	207	204	11,4	27,3	11,9	-15,4
3	208	190	15,4	15,4	27,3	11,9
4	208	210	3,8	37,9	31,1	-6,8
5	209	204	6,8	34,1	37,9	3,8

$$\Sigma = -21,9 \text{ Std}$$

Ausgehend von den Prioritätsrängen Plan-Rang und Ist-Rang wird die Reihenfolgeabweichung berechnet. Der Plan-Rang ergibt sich aus der Sortierung der Aufträge anhand der Plan-Endtermine und der anschließenden Summierung der Auftragszeiten bis zum betrachteten Auftrag. Der Ist-Rang ergibt sich analog aus der Sortierung der Aufträge nach Ist-Endterminen mit anschließender Aufsummierung der Auftragszeiten. Der Plan-Prioritätsrang von Auftrag 1 ist 15,9 Stunden und setzt sich aus der Auftragszeit des vorhergehenden Auftrags 3 (15,4 Std) und der eigenen Auftragszeit (0,5 Std) zusammen. Die Differenz zwischen dem Ist-Prioritätsrang und dem Plan-Prioritätsrang ergibt die Reihenfolgeabweichung [Kuyu13, S 39f.]:

$$RA_i = PR_{i, Ist} - PR_{i, Plan} \quad 2-12$$

- $RA_i$  : Reihenfolgeabweichung von Auftrag  $i$  [Std]
- $PR_{i, Ist}$  : Ist-Prioritätsrang von Auftrag  $i$  [Std]
- $PR_{i, Plan}$  : Plan-Prioritätsrang von Auftrag  $i$  [Std]

Setzt man die Reihenfolgeabweichung ins Verhältnis zur geplanten Leistung, erhält man die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [Kuyu13, S 43]:

$$TAA_{RA, i} = \frac{RA_i}{L_{Plan}} \quad 2-13$$

- $TAA_m$  : mittlere Abgangsterminabweichung von Auftrag  $i$  [BKT]
- $RA_i$  : mittlere Reihenfolgeabweichung von Auftrag  $i$  [Std]
- $L_{Plan}$  : Plan-Leistung [Std/BKT]

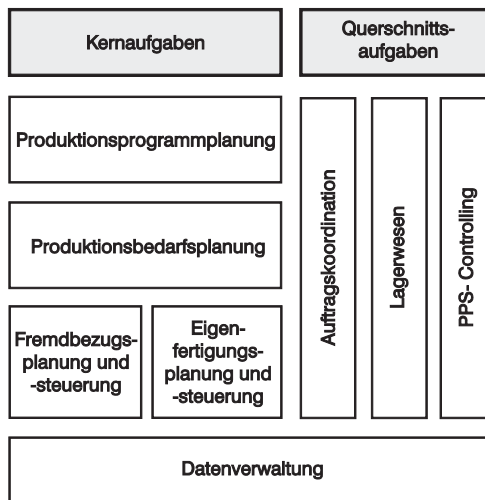
### 2.3 Fertigungssteuerung

Abschnitt 2.1 hat verschiedene Bevorratungsstrategien vorgestellt und dabei den Fokus auf die Auftrags- und Lagerfertigung gelegt. Beide Typen unterscheiden sich insbesondere auch in ihren bevorzugten logistischen Zielgrößen. Die Modellierung der Zielgrößen ist

Gegenstand von Abschnitt 2.2 und legt die Grundlage für die Beherrschung logistischer Zielgrößen. Die logistischen Ziele trotz vielfältiger Störungen im Produktionsablauf zu erfüllen, ist Aufgabe der Fertigungssteuerung, die in diesem Abschnitt behandelt wird.

### 2.3.1 Einordnung in die PPS

Die Fertigungssteuerung ist Teil der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und ein zentraler Bestandteil der Organisation eines produzierenden Unternehmens. Aufgabe der PPS ist es, das Produktionsprogramm im Voraus für mehrere Perioden zu planen und das Programm trotz unvermeidlicherer Störungen auch umzusetzen [Wien97, S. 12]. Im deutschen Sprachraum ist das Aachener PPS-Modell weit verbreitet, das verschiedene Aufgaben für die PPS definiert und zwischen Kern- und Querschnittsaufgaben differenziert (Abb. 2-2). Zu den Kernaufgaben zählen die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung sowie die Fremdbezugsplanung und -steuerung und die Eigenfertigungsplanung und -steuerung [Lucz98, S. 16f.].



13348

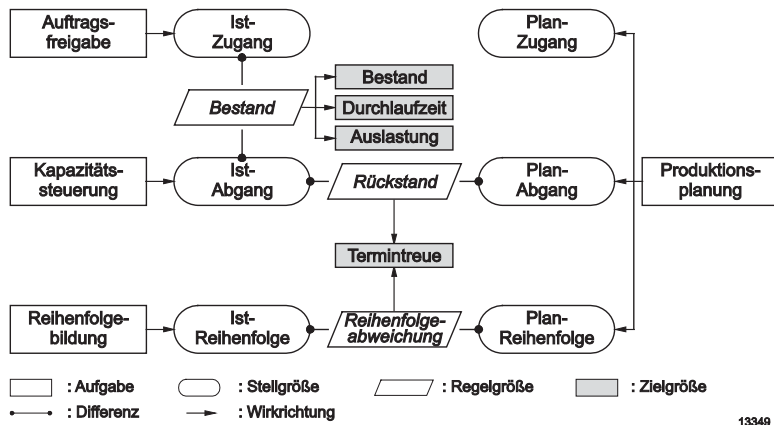
Abb. 2-2: Aufgaben im Aachener PPS-Modell [Lucz98, S. 16]

Die Fertigungssteuerung lässt sich in die Kernaufgabe „Eigenfertigungsplanung und -steuerung“ einordnen und bildet ein Teilgebiet der gesamten Produktionsplanung und -steuerung ab. Die Fertigungssteuerung ist dennoch von zentraler Bedeutung, da mit ihr die logistischen Zielgrößen einer Fertigung direkt beeinflusst werden können. Der Zusammenhang zwischen den Aufgaben der Fertigungssteuerung und den logistischen Zielgrößen ist Bestandteil des folgenden Abschnitts.

### 2.3.2 Modell der Fertigungssteuerung

Die Zusammenhänge zwischen den Aufgaben der Fertigungssteuerung und ihrer Zielgrößen können in einem Modell qualitativ dargestellt werden. Angelehnt an ein Regelsystem wirken die Aufgaben über Stell- und Regelgrößen auf die Zielgrößen ein (Abb. 2-3). Das Modell fasst die folgenden Wirkzusammenhänge zusammen [Lödd16, S. 8]:

1. Die Aufgaben legen die Stellgrößen fest.
2. Die Regelgrößen ergeben sich aus der Differenz zweier Stellgrößen.
3. Die Regelgrößen bestimmen die logistischen Zielgrößen.



13349

Abb. 2-3: Ein Modell der Fertigungssteuerung [Lödd16, S. 8]

Die Steuerungsaufgaben sind die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

#### 2.3.3 Auftragsfreigabe

Mit der Auftragsfreigabe gelangt ein Auftrag in die Fertigung und kann damit bearbeitet werden. Die Auftragsfreigabe legt den Umlaufbestand der Fertigung fest und bestimmt damit die Durchlaufzeit der Fertigung [Lödd16, S. 339].

Lödding definiert für die Auftragsfreigabe drei Unterscheidungsmerkmale [Lödd16, S. 339]:

1. Nach welchem Merkmal ein Auftrag in die Fertigung freigegeben wird, legt das *Kriterium der Auftragsfreigabe* fest.

2. Der *Detaillierungsgrad der Auftragsfreigabe* entscheidet, ob komplette Aufträge oder lediglich einzelne Arbeitsvorgänge freigegeben werden.
3. Ob die Freigabe periodisch oder ereignisorientiert erfolgt, bestimmt die *Auslösungslogik der Auftragsfreigabe*.

### **Kriterien der Auftragsfreigabe**

Werden die Aufträge nicht direkt mit ihrer Erzeugung freigegeben, können sie nach drei unterschiedlichen Kriterien freigegeben werden [Lödd16, S. 340]:

- **Plan-Starttermin:** Mit Erreichen des in der Terminierung bestimmten Start-termins gehen die Aufträge in die Fertigung über.
- **Bestand der Fertigung bzw. eines Arbeitssystems:** Die Freigabe prüft den Bestand der Fertigung oder eines Arbeitssystems und gibt bei Unterschreiten einer Plan-Bestandsgrenze Aufträge frei.
- **Belastung der Arbeitssysteme:** Die Auftragsfreigabe mit Belastungsabgleich berücksichtigt die aktuelle oder zukünftige Belastung der Arbeitssysteme. Diese Form der Freigabe ist somit ein Sonderfall der bestandsregelnden Auftragsfreigabe.

### **Detaillierungsgrad der Auftragsfreigabe**

Insbesondere für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe ist der Detaillierungsgrad von Bedeutung. Es existieren im Wesentlichen zwei Mechanismen [Lödd16, S. 349]:

- Die *zentrale Bestandsregelung* regelt den Bestand für den gesamten Fertigungsbereich. Ein Auftrag wird freigegeben, wenn der Plan-Bestand des Bereichs unterschritten wird. Die Bestandsprüfung findet in der Regel statt, wenn ein Auftrag den Bereich verlässt. Der Bestand kann in Vorgabestunden oder in Anzahl Aufträgen gemessen werden. Ein typisches Verfahren für die zentrale Bestandsregelung ist die Conwip-Steuerung (vgl. Abschn. 4.2.2).
- Die *dezentrale Bestandsregelung* kontrolliert den Bestand der Arbeitssysteme. Die Freigabe erfolgt meist innerhalb der Fertigung für einzelne Arbeitsvorgänge. Ein bekannter Vertreter dieser Form der Auftragsfreigabe ist die von Suri entwickelte Polca-Steuerung (vgl. [Suri98]), die den Bestand zwischen Fertigungsinseln meist mit Hilfe von Polca-Karten dezentral regelt.

### **Auslösungslogik**

Die Auftragsfreigabe kann entweder in regelmäßigen Abständen oder nach bestimmten Ereignissen erfolgen [Lödd16, S. 352]:

- Erfolgt eine Freigabe periodisch, entscheidet die Auftragsfreigabe zu zuvor definierten Zeitpunkten über die Freigabe neuer Aufträge. Es werden dann alle Aufträge freigegeben, die das Freigabekriterium erfüllen. Je größer die Periode, desto größer sind die resultierenden Bestandsschwankungen [Lödd16, S. 352].
- Erfolgt die Freigabe ereignisorientiert, prüft die Auftragsfreigabe nach bestimmten Ereignissen, ob neue Aufträge freigegeben werden können. Zu den relevanten Ereignissen zählen bspw. die Unterschreitung des Plan-Bestands und das Erreichen des Plan-Startzeitpunkts [Lödd16, S. 352f.].

### 2.3.4 Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung legt das Kriterium fest, nach dem an einem Arbeitssystem der nächste Auftrag ausgewählt wird. Dafür sind die Aufträge entsprechend festgelegter Kriterien priorisiert [Lödd16, S. 507]. Die Reihenfolgebildung hat eine steuernde Funktion und ist nicht zu verwechseln mit der Reihenfolgeplanung, die meist unter Optimierungsgesichtspunkten eine Plan-Reihenfolge festlegt.

In der Forschung existiert eine Vielzahl an Reihenfolgeregeln, die jedoch in der industriellen Praxis oftmals gar nicht bekannt oder nur schwierig umzusetzen sind. Die Forschung zur Reihenfolgebildung ist insbesondere durch die Arbeiten von Conway et al. geprägt, die bereits in den 1960er Jahren intensive Studien und Simulationsversuche zur Reihenfolgebildung durchgeführt haben (vgl. [Conw67]). Es ist leicht vorstellbar, dass der Einfluss der Reihenfolgebildung mit sinkendem Bestand in der Fertigung abnimmt. Je kürzer die Warteschlange vor einem Arbeitssystem, desto geringer ist auch die Auswirkung der Reihenfolgeentscheidung [Wien97, S. 305]. Die Reihenfolgebildung kann jedoch in begrenztem Maße Planungsfehler ausgleichen und für Auftragsfertiger relevante Zielgrößen unterstützen.

Im Folgenden werden Verfahren zur Reihenfolgebildung vorgestellt, welche die Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit oder Leistung aktiv in der Fertigung unterstützen.

#### Termintreue

Die Reihenfolgebildung hat, verglichen mit der Wirkung auf die übrigen logistischen Zielgrößen, einen relativ großen Einfluss auf die Termintreue, da sie direkt auf die Regelgröße Reihenfolgeabweichung einwirkt (vgl. Abb. 2-3). Es existieren daher einige Verfahren, die eine hohe Termintreue aktiv unterstützen.

- First in – First out (FIFO): Die FIFO-Regel sorgt dafür, dass die Aufträge in der Reihenfolge vom Arbeitssystem abgearbeitet werden, in der sie am System ein-

treffen. Derjenige Auftrag mit der längsten Wartezeit seit Eintreffen besitzt somit die höchste Priorität. Diese Logik kann daher als natürliche Reihenfolgeregel betrachtet werden. Die FIFO-Regel verhindert zwar eine große Streuung der Durchlaufzeit, Reihenfolgeabweichungen – bspw. im Zugang – können jedoch nicht mehr ausgeglichen werden [Lödd16, S. 509].

- **Frühester Plan-Starttermin / Frühester Plan-Endtermin (FPS / FPE):** Diese Regeln sortieren die Aufträge entsprechend ihrer Plan-Termine. Die in der Terminierung festgelegte Plan-Reihenfolge soll durch diese Verfahren in der Fertigung umgesetzt werden. Auftretende Reihenfolgeabweichungen können mindestens zum Teil ausgeglichen werden [Lödd16, S. 510]. Vorteilhaft bei der FPE-Regel ist, dass der Plan-Endtermin eines Arbeitsvorgangs in der Regel in den Auftragsbegleitpapieren verzeichnet ist und die Reihenfolgeregel somit leichter etabliert werden kann.
- **Schlupfzeitregel:** Der Schlupf bezeichnet die restliche Zeit eines Auftrags bis zur geplanten Fertigstellung abzüglich der verbleibenden Bearbeitungszeiten. Das Verfahren prüft, ob ein Auftrag bereits verspätet ist oder sich zu verspäten droht und priorisiert die Aufträge entsprechend. Die Bestimmung der Schlupfzeit ist mit Aufwand verbunden und wird daher häufig durch ein Fertigungsmanagementsysteme (MES) unterstützt [Klet07, S. 70].

### **Durchlaufzeit**

Die von Conway et al. empfohlene Kürzeste-Operationszeit-Regel (KOZ) vergibt die Priorität nach der Auftragszeit (vgl. [Conw67, S. 26ff.]). Derjenige Auftrag mit der geringsten Auftragszeit bekommt die höchste Priorität zugewiesen. Die von Conway et al. durchgeführten Simulationsversuche haben ergeben, dass das Verfahren im Vergleich zu anderen Reihenfolgeregeln zu niedrigen Beständen und geringeren Durchlaufzeiten führt [Conw67, S. 219ff.]. Nachteilig sind die starken Ausreißer von Aufträgen mit besonders großen Auftragszeiten.

### **Leistung**

Reihenfolgeregeln können in begrenztem Maße die Leistung eines Arbeitssystems erhöhen. Entweder, indem sie Rüstaufwände vermeiden oder indem sie Materialflussabrisse an nachfolgenden Systemen verringern.

- **Rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung:** Ziel dieser Reihenfolgeregel ist es, den Abgang des Arbeitssystems zu erhöhen. Voraussetzung hierfür sind reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, so dass die Reihenfolgebildung gezielt den Auftrag auswählen kann, der keine oder möglichst wenig Rüstaufwände verursacht. So kann die verfügbare Kapazität des Systems erhöht werden und bei Engpasssystemen sogar die Kapazität der gesamten Fertigung. Da der Plan-Termin als Kriterium nicht

mehr berücksichtigt wird, entstehen Reihenfolgeabweichungen, sodass dieses Verfahren einen negativen Einfluss auf die Termintreue hat [Lödd16, S. 514f.].

- Expected Work in Next Queue (XWINQ): Diese Reihenfolgeregel bestimmt die Priorität eines Auftrages anhand des Auftragsbestands am nächsten Arbeitssystem, das dieser Auftrag durchläuft. Ist der Bestand hoch, so hat der Auftrag eine geringere Priorität als ein Auftrag, an dessen nächsten Arbeitssystem ein geringerer Auftragsbestand wartet. Der Auftragsbestand des nächsten Arbeitssystems bemisst sich nicht nur aus bereits vorliegenden Aufträgen, sondern beinhaltet auch Aufträge, die noch vor dem auszuwählenden Auftrag eintreffen („*Expected Work*“). Ein Auftrag, der auf den letzten Arbeitsvorgang wartet, besitzt immer die höchste Priorität [Conw67, S. 223]. Auch dieses Verfahren berücksichtigt die Plan-Termine nicht, sondern strebt eine hohe Auslastung der Arbeitssysteme an.

### 2.3.5 Kapazitätssteuerung

Die Kapazitätssteuerung bestimmt kurz- oder mittelfristig über den Einsatz von Kapazitäten, bspw. über den innerbetrieblichen Austausch von Mitarbeitern oder durch die Anordnung zusätzlicher Schichten [Wien08, S. 324]. Die Kapazitätssteuerung legt somit den Ist-Abgang eines Systems fest und hat einen direkten Einfluss auf den Rückstand und die Termintreue [Lödd16, S. 531]. Für die Kapazitätssteuerung lassen sich ebenso wie für die Auftragsfreigabe Klassifizierungsmerkmale nennen und beschreiben:

1. Mit dem Kriterium der Kapazitätssteuerung wird festgelegt, nach welchem Merkmal über Kapazitätsanpassungen entschieden wird.
2. Der Detaillierungsgrad der Kapazitätssteuerung entscheidet darüber, ob die Kapazität der gesamten Fertigung oder die Kapazität eines einzelnen Arbeitssystems angepasst wird.
3. Die Auslösungslogik der Kapazitätssteuerung bestimmt, ob in regelmäßigen Abständen über eine Anpassung der Kapazität entschieden wird oder ob bestimmte Ereignisse eine Kapazitätsanpassung auslösen.

Von den genannten Merkmalen sollen im Folgenden die Kriterien der Kapazitätsteuerung näher erläutert werden.

#### Kriterien

Lödding nennt sieben Kriterien, die über eine Kapazitätsanpassung entscheiden können (vgl. [Lödd16, S. 532ff.]). Diese sollen an dieser Stelle nicht vollständig ausgeführt werden. Der Schwerpunkt liegt auf den für Auftragsfertiger besonders relevanten Kriterien. Dies sind:

- **Rückstand:** Ist der Rückstand der Fertigung oder eines Arbeitssystems positiv, so wird die Kapazität der Fertigung oder des Arbeitssystems erhöht. Ein negativer Rückstand führt entsprechend zu Kapazitätsreduzierungen. Die Rückstandsregelung hat insbesondere in der industriellen Praxis eine hohe Bedeutung [Lödd16, S. 533]. Das Unternehmen Toyota ist bekannt für eine besonders konsequente Umsetzung der Rückstandsregelung. Rückstände werden dort direkt in Form von Überstunden aufgearbeitet [Take13, S. 112].
- **Abweichung von der Plan-Kapazität:** Bei diesem Kriterium reagiert die Kapazitätssteuerung, sobald die zur Verfügung stehende Kapazität von der geplanten Kapazität abweicht. Fällt bspw. ein Mitarbeiter krankheitsbedingt aus, wird dieser vom Meister oder einem ausgebildeten Springer ersetzt. Das Verfahren ermöglicht es, Rückständen vorzubeugen, es berücksichtigt jedoch nicht alle Ursachen der Rückstandsentstehung [Lödd16, S. 533f.].

### 2.4 Die konventionelle Wertstrommethode

Die Wertstrommethode hat zum Ziel, den Material- und Informationsfluss einer Produktfamilie abzubilden und zu verbessern. Ursprünglich als „Diagramm über den Material- und Informationsfluss“ bezeichnet, dient es bei Toyota der Schulung von Zulieferern in den Grundlagen des Toyota Produktionssystems. [Like08, S. 380]. Das Vorgehen hat sich bei vielen Industrieunternehmen als Quasistandard etabliert und bildet oftmals den ersten Schritt in Verbesserungsprojekten [Grew08, S. 404]. Rother und Shook haben diesen Kommunikationsstandard systematisch aufbereitet und durch konkrete Leitlinien formalisiert (vgl. [Roth04]). Die folgende Beschreibung der Wertstrommethode orientiert sich an der Darstellung von Rother und Shook.

#### 2.4.1 Wertstromanalyse

Die Wertstromanalyse dient der schrittweisen Darstellung des Ist-Zustands mit dem Ziel, Missstände in der Produktion aufzuzeigen. Erlach hat das von Rother und Shook vorgeschlagene Standardvorgehen (vgl. [Roth04, S. 11ff.]) in vier Schritte gegliedert [Erla07, S. 36]:

- Auswahl einer Produktfamilie
- Analyse des Kundenbedarfs
- Aufnahme des Wertstroms
- Ermittlung des Verbesserungspotentials

### **Auswahl einer Produktfamilie**

Die Produktfamilie bezeichnet in der Produktion eine Menge an Produkten mit ähnlichen Produktionsprozessen auf den gleichen Arbeitssystemen [Erla07, S. 38]. Der Bildung von Produktfamilien und der Auswahl einer darzustellenden Familie liegt der Gedanke der Segmentierung der Fertigung zugrunde [Voll04, S. 130] und dient vor allem der Komplexitätsreduzierung [Lee14, S. 25]. Für komplexe Produkte empfehlen Rother und Shook die Verwendung einer Produkt-Prozess-Matrix [Roth04, S. 6]. Die Matrix unterstützt eine systematische Clusterung der Produkte. Da nicht nur Produkte mit identischer, sondern auch mit ähnlicher Bearbeitungsfolge zu einer Familie geclustert werden, muss deren Ähnlichkeit bestimmt werden. Die Ähnlichkeit zweier Produktfamilien kann über den sogenannten Jaccard-Koeffizienten bestimmt werden (vgl. [Brag06, S. 3933]), es bleibt jedoch vage, ab welchem Ähnlichkeitswert die Produkte zusammengefasst werden können [Erla07, S. 40]. Die Zusammenfassung von Produkten zu einer Produktfamilie liegt daher immer im Ermessensbereich des Durchführenden der Wertstromanalyse.

### **Durchführung der Kundenbedarfsanalyse**

Eine zentrale Kennzahl der klassischen Wertstromanalyse ist der Kundentakt, der den Kundenbedarf für ein bestimmtes Produkt ausdrückt und aus sich aus dem durchschnittlichen Stückbedarf für eine Produktfamilie ableitet. Der Kundentakt sollte bereits in der Vorbereitung der eigentlichen Datenaufnahme bestimmt werden. Erlach empfiehlt, den Kundentakt als Quotienten aus der verfügbaren Betriebszeit pro Jahr und dem Kundenbedarf pro Jahr anzugeben, um saisonale Schwankungen auszugleichen [Erla07, S. 47f]. Der Kundentakt hilft dabei, den Produktions- an den Verkaufsrhythmus abzustimmen.

### **Aufnahme des Wertstroms**

Die Aufnahme des Wertstroms beginnt mit der Einzeichnung des Kundensymbols und des entsprechenden Kundentakts auf einem leeren Blatt Papier. Anschließend folgt der Anwender vom Versand ausgehend dem Materialfluss flussaufwärts und stellt die Produktionsprozesse der betrachteten Produktfamilie dar. Jeder Prozess wird durch einen Prozesskasten repräsentiert. Die Kästen enthalten die folgenden prozessspezifischen Informationen [Roth04, S. 15]:

- Taktzeit des Prozesses („*Cycle time*“)
- Rüstzeit für einen Produktwechsel
- beschäftigte Mitarbeiter je Prozess
- Maschinenzuverlässigkeit
- verfügbare Arbeitszeit

Zusätzlich werden an allen Systemen die Bestände erfasst. Neben dem Rohmaterial und dem Fertigwarenbestand zählt dazu auch der Bestand zwischen zwei Prozessen. Um den Bestand der ausgewählten Produktfamilie zu ermitteln, werden alle Teile gezählt, die dieser Produktfamilie angehören und anschließend durch ein mit einem I („Inventory“) gekennzeichnetem Dreieck symbolisiert [Roth04, S. 18]. Die Zahl der Teile lässt sich in der Großserienproduktion mit standardisierten Behälterinhalten in der Regel relativ leicht ermitteln. Existieren keine standardisierten Container, wird das Zählen der Teile sehr schnell aufwändig.

Ist der Materialfluss vollständig abgebildet, wird die Wertstromkarte um den Informationsfluss ergänzt. Dieser beinhaltet in vereinfachter Form alle Informationen, die vom Kunden in das Unternehmen eingehen und über die Produktionsplanung und -steuerung in die Fertigung weiterfließen. Dies sind [Roth04, S. 24]:

- eingehende Kundenaufträge
- Planvorgaben für die Arbeitssysteme (meist auf Wochenbasis)
- täglicher Lieferplan
- Bestellinformationen an die Zulieferer

Neben diesen Planungsinformationen werden in eingeschränktem Maße auch Steuerungsinformationen in die Karte des Ist-Zustands eingetragen. So wird über gestreifte Pfeile die sogenannte Push-Bewegung zwischen zwei Prozessen gekennzeichnet. Diese signalisieren, dass Aufträge nach der Fertigstellung an einem Arbeitssystem direkt an das nachfolgende System übergeben werden, ohne dessen Bedarf zu kennen [Roth04, S. 25]. Dieses Symbol ist besonders auffällig gestaltet, da es einen verbesserungswürdigen Prozess kennzeichnet. Die Aufnahme weiterer Steuerungsinformationen ist in der Wertstromanalyse nicht vorgesehen.

Die Ergänzung einer Zeitlinie unter den Prozessen und Beständen schließt den Ist-Zustand ab. Die Durchlaufzeit wird an jedem Prozess mit Hilfe von Littles Gesetz bestimmt, indem der Bestand in Stück durch die Bedarfsrate geteilt wird. Die Zeitlinie zeigt die Wertschöpfungszeit als Summe der Zykluszeiten aller Prozesse und die Durchlaufzeit für die abgebildete Prozessfolge. Abb. 2-4 zeigt beispielhaft einen resultierenden Wertstrom.

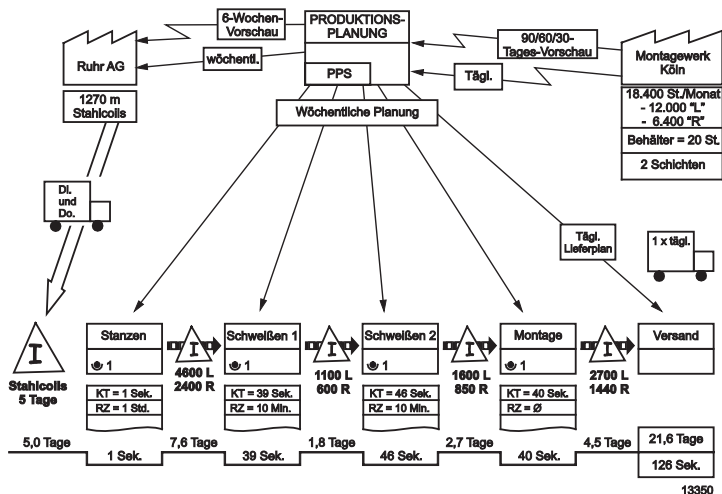


Abb. 2-4: Beispielhafte Darstellung des Ist-Zustands [Roth04, S. 27]

### Ermittlung des Verbesserungspotentials

Um die Wertstromanalyse abzuschließen, ist es im letzten Schritt erforderlich, die Verbesserungspotentiale auszuweisen. Die Verbesserungspotentiale beziehen sich in der konventionellen Analyse auf drei Punkte [Erla07, S. 92f.]:

- Die Zeitlinie erlaubt es, die Durchlaufzeit direkt mit der Wertschöpfungszeit zu vergleichen. Diese Bewertung zeigt, wie träge der Produktionsfluss ist und an welchen Stellen bzw. Prozessen sich die größten Stautufen befinden [Erla07, S. 92].
- Der Produktionstakt und der erforderliche Kundentakt der Produktfamilie geben Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der aktuellen Prozesse und darüber, wie gut diese aufeinander abgestimmt sind [Erla07, S. 92].
- Die Vor-Ort-Aufnahme und die übersichtliche Darstellung erlauben es, Schwächen des Produktionsablaufs zu erkennen [Erla07, S. 92] und eine tatsächliche Fertigungssituation zu erleben.

Die genannten Punkte zeigen einen grundlegenden Ansatz der Wertstrommethode auf, der sich zudem in dem Titel des Standardwerks von Rother und Shook manifestiert: „Sehen Lernen“. Die Methoden-anwender sollen schon während des Rundgangs Anzeichen für Verschwendungen erkennen und für diese sensibilisiert werden.

### 2.4.2 Wertstromdesign

Im Wertstromdesign erfolgt die organisatorische Umgestaltung der Fertigung und somit die Abbildung des Soll-Zustands. Zentrales Element der Umgestaltung sind sieben Designleitlinien, mit denen der Ist-Zustand in den Soll-Zustand überführt werden kann [Roth04, S. 37ff.]:

1. *Nach Taktzeit montieren*: Ziel ist es, den Produktionstakt an den Kundentakt anzugleichen. Mit der Montage nach Taktzeit ist sichergestellt, dass die Kundennachfrage auch gedeckt werden kann.
2. *Kontinuierliche Fließfertigung mit FIFO-Prinzip realisieren*: Die Idealvorstellung des klassischen Wertstromdesigns ist eine Fertigung, in der Rohmaterial hineinfließt und in mehreren Prozessschritten ohne anzuhalten in das Endprodukt umgewandelt wird [Erla07, S. 134]. Zur Bestandsbegrenzung zwischen zwei Prozessen sollten diese durch FIFO-Bahnen miteinander verbunden sein, deren Kapazität begrenzt ist.
3. *Supermarkt-Pull-Systeme (Kanban) installieren*: Immer dort, wo sich keine Fließfertigung einrichten lässt, sollen zwei Prozesse durch eine Kanban-Steuerung miteinander verbunden werden. Diese Steuerung sorgt dafür, dass der vorgelagerte Prozess nur das erzeugt, was der nachgelagerte Prozess verbraucht.
4. *Produktionsplanung nur an einer Stelle im Wertstrom ansetzen*: Es sollen nicht alle Prozesse von einer übergeordneten PPS beplant und gesteuert werden, sondern nur ein ausgewählter Schrittmacherprozess. Dem Schrittmacherprozess vorgelagerte Prozesse werden über ein Kanban-System gesteuert.
5. *Produktmix am Schrittmacherprozess ausgleichen (Nivellieren)*: Am Schrittmacherprozess soll der Ausgleich des Produktionsmix stattfinden, d.h. die Produktion verschiedener Produkte soll gleichmäßig über einen definierten Zeitraum verteilt werden. Dies soll einen hohen Servicegrad bei möglichst niedrigen Beständen sicherstellen.
6. *Produktionsvolumen am Schrittmacherprozess ausgleichen (Losgrößen)*: Fertigungsaufträge sollen in möglichst kleinen und einheitlichen Umfängen an den Schrittmacherprozess gesendet werden. Dieser sogenannte Pitch ist oftmals ein Vielfaches der Taktzeit und soll diese in der Fertigung erkennen lassen.
7. *Die Fähigkeit entwickeln, jedes Teil jeden Tag produzieren zu können*: Diese Leitlinie besagt, dass die Rüstzeiten reduziert und die Produktionslose verkleinert werden sollten, um schneller auf Bedarfsänderungen reduzieren zu können.

Die Leitlinien erzeugen schrittweise den Soll-Zustand der Produktion. Das konventionelle Wertstromdesign hat als übergeordnetes Ziel, Durchlaufzeiten und Bestände zu reduzieren, indem möglichst durchgängig eine kontinuierliche Fließfertigung installiert wird. Abb. 2-5 zeigt beispielhaft einen Soll-Wertstrom.

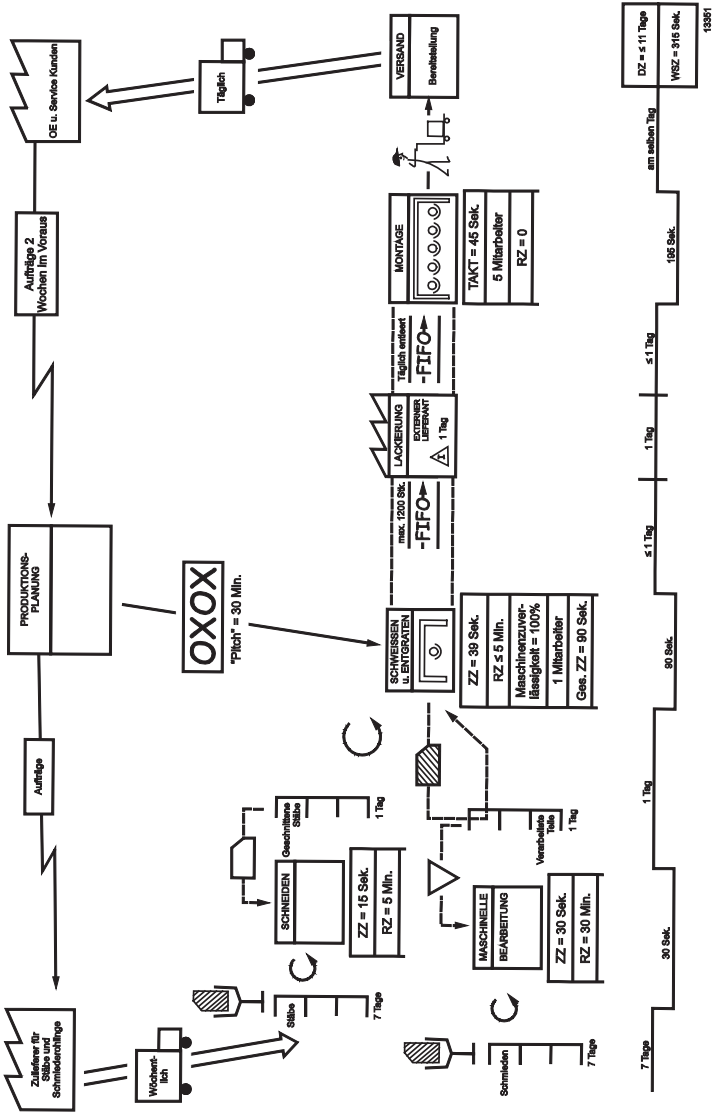


Abb. 2-5: Beispielhafte Darstellung des Soll-Wertstroms i.A. [Rother08, S. 72f.]

### 2.4.3 Bewertung der Wertstrommethode

Die Wertstrommethode wird branchenübergreifend häufig als Ausgangspunkt für Verbesserungsprozesse genutzt, um die Logistikleistung eines Unternehmens zu verbessern. Grundgedanke der Methode ist dabei die Etablierung eines kontinuierlichen Flusses in der Produktion, der es ermöglicht, die Bestände zu senken, die Durchlaufzeiten zu verkürzen und die Produktivität zu erhöhen. Die Erfassung in einem Fertigungsrundgang vor Ort, die verbesserungsorientierte Darstellung sowie ihr im Vergleich zu anderen Methoden der Produktionsverbesserung geringer Aufwand macht die Methode attraktiv für die Anwendung in der Praxis. Dabei stehen bei den Anwendern laut einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) folgende logistische Zielgrößen im Fokus [Spat10, S. 44]:

- Reduktion der Durchlaufzeit
- Verbesserung von Lieferfähigkeit und Termintreue
- Reduktion von Beständen

Die Wertstrommethode wird folglich häufig mit dem Ziel eingesetzt, nicht nur die Durchlaufzeit zu reduzieren, sondern auch die Termintreue in der Fertigung zu erhöhen. Dies betonen insbesondere auch die Teilnehmer der Studie, deren Fertigung in einer Werkstattstruktur organisiert ist [Spat10, S. 43]. Eine umfassende Analyse logistischer Zielgrößen bei einem vertretbaren Aufwand ist daher ein Kriterium, an dem sich ein Verfahren messen lassen muss. Für die Wertstrommethode lassen sich für einen Einsatz in der Auftragsfertigung sowohl Defizite in der Wertstromanalyse als auch Defizite im Wertstromdesign benennen.

Der zentrale Nachteil der Wertstromanalyse in ihrer konventionellen Form ist die unvollständige Erfassung der logistischen Zielgrößen einer Fertigung. Die Analyse erfasst weder die Termintreue noch deren Einflussgrößen Reihenfolgeabweichung und Rückstand (vgl. Abschn. 2.2.3). Die Erfassungsmethodik der übrigen Ziel- und Einflussgrößen ist zudem für Auftragsfertiger häufig ungeeignet: Der Bestand wird in Stück gezählt; was bei Standard-Containergrößen in der Serienfertigung ein probates Vorgehen darstellt, bedeutet jedoch für die meisten kleineren und mittleren Unternehmen einen großen Aufwand, da meist Aufträge mit unterschiedlichen Losgrößen vorliegen und die einer Produktfamilie zugehörigen Aufträge erst identifiziert werden müssen. Die Durchlaufzeit ergibt sich aus der Division von Bestand der Produktfamilie und dem Kundentakt. Unternehmen mit Einzel- und Kleinserienfertigung, die in der Regel Auftragsfertiger sind, haben jedoch häufig Schwierigkeiten, einen verlässlichen Kundentakt zu bestimmen [Spat10, S. 71]. Zudem müsste der Kundentakt für eine Vielzahl an Produktfamilien bestimmt werden, da es in der Regel nicht eine dominierende Produktfamilie gibt. Das gesamte Vorgehen in der

Wertstromanalyse ist jedoch auf der Auswahl einer Produktfamilie aufgebaut. Das Aufnahmeverfahren beruht zudem auf der Grundannahme einer nach Produktfamilien segmentierten Fertigung. Liegt eine Werkstattfertigung vor, ist diese Annahme nicht mehr zu treffend.

Auch das Wertstromdesign ist nicht darauf ausgelegt, die relevanten logistischen Zielgrößen einer Auftragsfertigung zu beeinflussen. Im Wertstromdesign existieren keine Werkzeuge, welche die Termintreue direkt verbessern können. Zentrale Steuerungselemente des Wertstromdesigns sind die Kanban-Steuerung und die Fließfertigung mit einer Reihenfolgebildung nach dem FIFO-Prinzip (Abb. 2-6).

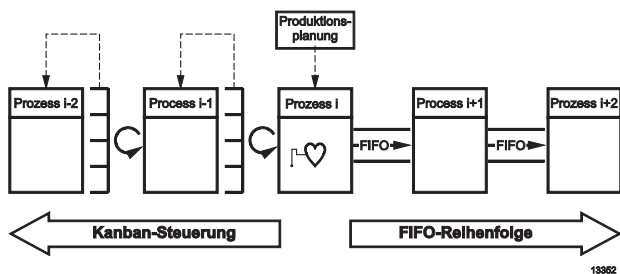


Abb. 2-6: Methoden des klassischen Wertstromdesigns

Die Kanban-Steuerung ist als Verfahren zur Auftragserzeugung per Definition nur für eine Lagerfertigung geeignet. Eine Fließfertigung mit FIFO-Reihenfolgebildung ist in der Auftragsfertigung meist nicht realisierbar. Stark streuende Auftragszeiten und komplexe Materialflüsse verhindern in der Regel die Organisation der Fertigung nach dem Fließprinzip. FIFO-Bahnen vermeiden zwar auch in der Auftragsfertigung eine chaotische Reihenfolgebildung, sie unterstützen aber nicht aktiv die Termintreue, da auch verspätete Aufträge in der Reihenfolge des Zugangs abgearbeitet und nicht beschleunigt werden.

Neben den beiden genannten Aufgaben mit ihren konkreten Methoden, Auftragserzeugung per Kanban und Reihenfolgebildung nach FIFO-Logik, kennt die Literatur jedoch noch weitere Aufgaben für die Fertigungssteuerung, die in der klassischen Wertstrommethode ungenannt bleiben. Dazu zählen die Auftragsfreigabe und die Kapazitätssteuerung. Gerade die Auftragsfreigabe ist ein für Auftragsfertiger gut geeignetes Mittel, um den Lean-Gedanken in ihre Fertigung zu übertragen (vgl. [Thür12, S. 939]). Die Kapazitätssteuerung in Gestalt einer Rückstandsregelung ist integraler Bestandteil des Toyota-Produktionssystems und sollte sich daher auch in der Designstufe der Wertstrommethode wiederfinden.

#### **2.4.4 Wertstromdesign und Fertigungssteuerung: eine Analogiebetrachtung**

Dieser Abschnitt widmet sich der Bildung einer Analogie zwischen dem Wertstromdesign und der Fertigungssteuerung. Beide Funktionen zielen darauf ab, die Leistungsfähigkeit eines Produktionsbereichs durch organisatorische Maßnahmen zu verbessern. Dabei gibt es im Wesentlichen vier analogiebildende Elemente beider Funktionen:

- Verbesserung der logistischen Zielgrößen
- Nutzung logistischer Wirkbeziehungen
- Gestaltung der Informationsflüsse
- Gestaltung der Materialflüsse

##### **Element 1: Verbesserung logistischer Zielgrößen**

Die Wertstromanalyse identifiziert als wesentliche Verschwendung hohe Bestände und lange Wartezeiten (vgl. [Roth04]). Die mit dem Wertstromdesign verbundenen Maßnahmen zielen daher auf eine Reduzierung des Umlaufbestands und eine Verkürzung der Durchlaufzeit ab. Dies sind zwei klassische logistische Zielgrößen, die auch in der Fertigungssteuerung Teil des Zielgrößenkatalogs sind (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Fertigungssteuerung eines Unternehmens hat ebenfalls zum Ziel, durch eine geeignete Konfiguration die logistischen Zielgrößen des Unternehmens sicherzustellen. Neben der Durchlaufzeit und dem Bestand ist in der Fertigungssteuerung auch die Termintreue bekannt.

##### **Element 2: Nutzung logistischer Wirkbeziehungen**

Um das Ziel einer geringeren Durchlaufzeit zu erreichen, greift die Wertstrommethode auf Little's Gesetz zurück. Dieses Modell ermittelt die Durchlaufzeit eines Systems, indem es die Anzahl der im System befindlichen Einheiten durch die Zugangsrate der Einheiten teilt. Die Zugangsrate eines Systems wird über den Kundentakt bestimmt und der Bestand an Einheiten wird in einem Rundgang gezählt. Bei unveränderlichem Kundentakt ist es daher notwendig, den Bestand an den Arbeitssystemen zu reduzieren, um eine Durchlaufzeitverkürzung zu erwirken.

Das Verständnis des Autors von Fertigungssteuerung ist maßgeblich geprägt durch das Modell der Fertigungssteuerung, das die logistischen Zielgrößen einer Fertigung über Stell- und Regelgrößen mit gestalterischen Aufgaben verbindet. Die Durchlaufzeit und der Umlaufbestand sind im Modell der Fertigungssteuerung direkt über das Hannoveraner Trichtermodell verknüpft. Zudem wirken im Modell die Regelgrößen Rückstand und Reihenfolgeabweichung auf die Zielgröße Termintreue ein. Diese qualitative Verknüpfung lässt sich ähnlich wie das Trichtermodell quantifizieren (vgl. [Kuyu13]).

### **Element 3: Gestaltung von Materialflüssen**

Das Wertstromdesign verwendet konkrete Leitlinien zur Veränderung des Materialflusses, um die Durchlaufzeit von Aufträgen durch die Fertigung zu verkürzen. Eine der wesentlichen Maximen des Wertstromdesigns ist es, schnelle Änderungen unter Berücksichtigung der aktuellen Gegebenheiten herbeizuführen [Roth04]. Diese heißt im konkreten Fall, dass bspw. die Konstruktion eines Produkts, die vorhandenen Fertigungstechnologien oder auch der Fabrikstandort hingenommen werden und lediglich produktionsorganisatorische Veränderungen vorgenommen werden. Die vorgeschlagenen Leitlinien sind im Wesentlichen Verfahren zur Gestaltung des Materialflusses.

Die Fertigungssteuerung kennt ebenfalls Aufgaben, die den Materialfluss einer Produktion beeinflussen. Hier ist zum einen die Auftragsfreigabe zu nennen, die den Fertigungsbestand mit dem Poolbestand verbindet und somit festlegt, wann ein Auftrag zur Bearbeitung verfügbar ist. Zur Umsetzung der Auftragsfreigabe ist eine Vielzahl an konkreten Methoden bekannt. Als weitere materialflussbestimmende Aufgabe dient in der Fertigungssteuerung die Reihenfolgebildung. Die Reihenfolgebildung bestimmt, welcher Auftrag in der Warteschlange eines Arbeitssystems als nächstes bearbeitet wird.

### **Element 4: Gestaltung von Informationsflüssen**

Im Wertstromdesign soll neben dem Material- auch der Informationsfluss in einer Fertigung verbessert und nach vorgegeben Leitlinien gestaltet werden. Die Leitlinien sehen bspw. vor, dass die Information über den Produktionsplan nur an einer Stelle im Materialfluss ansetzen soll. Die Kanban-Steuerung ist zudem für die Informationsversorgung innerhalb der Fertigung zuständig

Die Konfiguration der Fertigungssteuerung beinhaltet immer eine Definition von Informationsströmen innerhalb der Fertigung sowie zwischen der Produktionsplanung und der Fertigung. Diese Informationsströme werden mit der Auswahl der Aufgaben der Fertigungssteuerung festgelegt. Als kurzes Beispiel soll an dieser Stelle die Auftragsfreigabe dienen. Erfolgt die Auftragsfreigabe nach Termin, wird der terminierte Plan-Starttermin eines Auftrags von der Produktionsplanung an die Fertigung kommuniziert. Anhand des Termins wird anschließend der Auftrag freigegeben. Bei einer bestandsregelnden Auftragsfreigabe ist zusätzlich der Zugang von Aufträgen zu einer Fertigung mit deren Abgang verknüpft. Verlässt ein Auftrag das letzte Arbeitssystem, sendet dieses eine Information an die Auftragsfreigabe.

## 2.5 Bestehende Ansätze zur Erweiterung der Wertstrommethode

In diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze zur Erweiterung der Wertstrommethode für Auftragsfertiger vorgestellt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die genannten Autoren nicht in jedem Fall explizit die Auftragsfertigung als Zielsystem benennen, jedoch über Anwendungsgebiete der Methode wie *komplexe Produktionssysteme* oder *Werkstätten* implizit einbeziehen. Da eine Abgrenzung zu Engineer-to-Order-Systemen (ETO) nicht immer eindeutig möglich ist, werden zudem relevante Erweiterungen benannt, die für den Einsatz in ETO-Systemen gedacht sind. Die wesentlichen Verfahren sind:

- Erweitertes Verfahren der Wertstrommethode (Mike Rother)
- Improved Value Stream Mapping
- Manufacture-to-Order Value Stream Mapping
- Job Shop Value Stream Mapping
- Value Network Mapping
- Engineer-to-Order Value Stream Mapping

### 2.5.1 Verfahren von Mike Rother

Die von Mike Rother vorgeschlagene Erweiterung der Wertstrommethode ist als Spezialverfahren für Auftragsfertiger gedacht. Das Verfahren ist auf das Wertstromdesign beschränkt; die Wertstromanalyse bleibt in der bisherigen Form bestehen. Für das Wertstromdesign schlägt Rother drei Änderungen vor [Roth05, S. 1f.]:

1. Die Arbeitssysteme sollen ausschließlich über FIFO-Bahnen verbunden werden, auf denen sich ein ausreichend großer Umlaufbestand befindet, um das Engpasssystem vollständig auszulasten. Dies soll verhindern, dass die Leistung der gesamten Fertigung durch Auslastungsverluste am Engpasssystem herabgesetzt wird.
2. Fertigungsaufträge sollen in einer definierten und gleichbleibenden Größe an das erste Arbeitssystem freigegeben werden. Die Auftragsgröße soll sich dabei an der Kapazität des Engpassarbeitssystems orientieren. Dieser Ansatz setzt voraus, dass ein stabiler Engpass existiert
3. Ein definierter Vorgriffshorizont in der Auftragsfreigabe schützt die Arbeitssysteme vor einer schwankenden Belastung, die durch Streuungen im Auftragseingang ausgelöst werden.

Abb. 2-7 zeigt die Änderung für das Wertstromdesign anhand eines einfachen Beispiels. Das Arbeitssystem „Lackieren“ wurde als Engpasssystem identifiziert und bestimmt

demnach den Zugang zur Fertigung. Sobald am Arbeitssystem „Lackieren“ ein Auftragsvolumen von einer Stunde fertiggestellt wird, gibt die Produktionsplanung und -steuerung Fertigungsaufträge in Höhe von einer Stunde frei. Eine Kanban-Steuerung entfällt im Falle einer Auftragsfertigung vollständig.

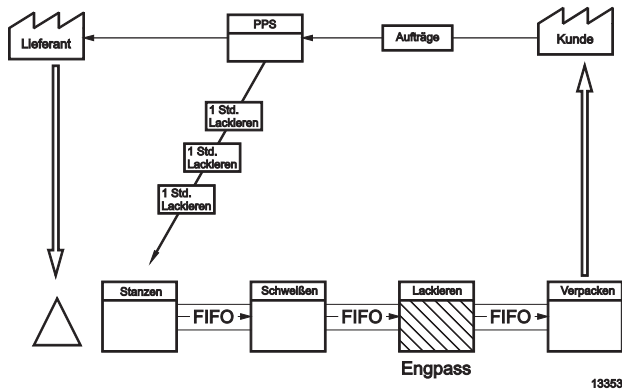


Abb. 2-7: Maßnahmen zur Wertstromverbesserung in der Auftragsfertigung [Roth05, S. 2]

Das vorgestellte Verfahren weist trotz relevanter Erweiterungen im Vergleich zur konventionellen Methode Hindernisse auf, die eine Anwendung bei vielen Auftragsfertigern erschweren:

- Der Fokus liegt weiterhin auf der Durchlaufzeit. Die Termintreue und ihre Einflussgrößen bleiben weiterhin unberücksichtigt.
- Die FIFO-Logik wird den meisten Auftragsfertigern mit Werkstattstrukturen nicht gerecht, da sie verspätete Aufträge nicht beschleunigt.
- Die Identifizierung eines stabilen Engpasses fällt vielen Auftragsfertigern schwer, insbesondere, wenn eine Werkstattfertigung vorliegt.

## 2.5.2 Improved VSM

Braglia et al. haben einen Ansatz entwickelt, um die Wertstrommethode auch bei sehr komplexen Materialflüssen anzuwenden [Brag06]. Die grundsätzliche Idee ihres Verfahrens ist es, die Wertstromanalyse iterativ durchzuführen. Dazu schlagen die Autoren ein siebenstufiges Vorgehen vor [Brag06, S. 3932f.]:

1. Auswahl einer Produktfamilie
2. Identifikation von Arbeitssystemen, die von mehreren Produktfamilien durchlaufen werden
3. Identifikation des Hauptwertstroms
4. Darstellung des kritischen Pfads
5. Identifikation und Analyse von Verschwendungen
6. Erstellung eines Soll-Wertstroms für den kritischen Pfad
7. Identifizierung eines neuen kritischen Pfads und Iteration des Prozesses

Das Verfahren richtet große Aufmerksamkeit auf die Gruppierung und Auswahl von Produktfamilien. Um Produktfamilien zu identifizieren, erstellen die Autoren eine Arbeitssystem-Produkt-Matrix und nutzen diese als Grundlage für eine Clusteranalyse. Sind die Produktfamilien identifiziert, folgen Pareto-Analysen, welche die Familien sowohl nach Umsatz als auch nach Produktionszahlen bewerten und in einer Korrelationsmatrix darstellen. Die eigentliche Darstellung des Wertstroms erfolgt anschließend für den kritischen Pfad der ausgewählten Produktfamilie. Sind Verschwendungen auf diesem Pfad behoben, soll ein neuer kritischer Pfad identifiziert und die Schritte fünf bis sieben wiederholt werden [Brag06, S. 3933ff.].

Das Verfahren ist insgesamt sehr aufwendig in der Durchführung, da es zunächst durch die Anwendung zahlreicher Werkzeuge den kritischen Pfad einer Produktfamilie durch komplexe Materialflüsse ermittelt. Das Verfahren erhöht somit den Aufwand in der Vorbereitungsphase deutlich. Die Durchführung der Wertstromanalyse und des Wertstromdesigns orientiert sich an der konventionellen Methode mit ihren bereits diskutierten Vor- und Nachteilen (vgl. Abschn. 2.4.3).

### 2.5.3 **Manufacture-to-Order VSM**

Die von Braglia et al. empfohlene Vorgehensweise haben Stamm und Neitzert aufgegriffen und in eine für Auftragsfertiger angepasste Form überführt [Stam08]. Ist ein kritischer Pfad identifiziert, folgt der Anwender einem ausgewählten Fertigungsauftrag auf diesem Pfad. Dabei werden für den betrachteten Auftrag an jedem Arbeitssystem minutengenau die Wartezeit, die Rüstzeit und die Bearbeitungszeit gemessen. Als zusätzliche Kennzahl wird die relative Fließgeschwindigkeit („*Relative Flow Velocity*“) ermittelt. Diese setzt die Wartezeit ins Verhältnis zur Rüst- und Bearbeitungszeit [Stam08, S. 8].

$$\text{Relative Fließgeschwindigkeit} = \frac{\text{Wartezeit}}{\text{Rüstzeit} + \text{Bearbeitungszeit}} \quad 2-14$$

Diese relative Kennzahl erlaubt es einerseits, den aufgenommenen Wertstrom zu bewerten, da zu Beginn der Analyse ein Zielwert festgelegt wurde. Andererseits können aus Produktionssicht ähnliche Fertigungsaufträge miteinander verglichen werden.

Für das Wertstromdesign schlagen die Autoren drei Maßnahmen vor [Stam08, S. 12], die sich stark an der Theory of Constraints von Goldratt orientieren (vgl. [Gold84]) und recht vage beschrieben sind:

1. Das Engpasssystem soll möglichst hoch ausgelastet werden, um die Ausbringung der gesamten Fertigung hoch zu halten.
2. Die Einplanung eines Auftrags und die Reihenfolgebildung am Engpasssystem sollten nach der Dringlichkeit des Auftrags erfolgen.
3. Fällt die Ist-Kapazität unter die Plan-Kapazität, so soll die Ist-Kapazität erhöht werden, bspw. durch Auslagerungen. Dieses Vorgehen entspricht der Planorientierten Kapazitätssteuerung (vgl. [Lödd16, S. 573ff]).

Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass sich über relative Kennzahlen verschiedene Produkte miteinander vergleichen lassen. Dies ist für Auftragsfertiger mit einer breiten Produktpalette ein hilfreiches Vorgehen. Die Kennzahlen beschränken sich jedoch auf die Durchlaufzeit; die Termintreue fehlt auch in diesem Ansatz. Das vorgeschlagene Wertstromdesign kann theoretisch bei vielen Auftragsfertigern umgesetzt werden, ist jedoch für einen Einsatz in der Praxis zu ungenau beschrieben. Es fehlt zudem eine Visualisierung des Soll-Zustands, die als Kommunikationsmittel zu Erläuterung verwendet werden kann. Das Verfahren ist zudem aufgrund des iterativen Ansatzes und der Echtzeitverfolgung von Aufträgen sehr aufwendig.

### 2.5.4 Job Shop VSM

Chitturi et al. betrachten in ihrem Ansatz eine Auftragsfertigung, die in einer Werkstattstruktur organisiert ist [Chit07, S. 142ff.]. Die Autoren empfehlen eine angepasste Wertstromanalyse, um den Ist-Zustand einer Auftragsfertigung möglichst umfassend darzustellen. Die wesentlichen Änderungen sind [Chit07, S. 144]:

- Um die Durchlaufzeit einer Produktfamilie zu bestimmen, muss zunächst die Taktzeit bestimmt werden. Da in der Regel keine Absatzprognose für eine Produktfamilie vorliegt, wird die Taktzeit aus vergangenen Bedarfsraten ermittelt. Dabei werden saisonale Schwankungen berücksichtigt.
- Der aus der konventionellen Wertstromanalyse bekannte Informationsfluss wird in diesem Ansatz erweitert. So wird bspw. der Fluss der Auftragsbegleitpapiere von der Produktionsplanung bis zum Versand dargestellt.

- Ergänzend zur bekannten Zeitlinie wird eine zweite Linie eingezeichnet, die symbolisiert, wie groß der Aufwand der Suche nach Planungs- und Steuerungsinformationen an diesem Arbeitssystem ist.

Die Autoren geben keine Empfehlung für ein angepasstes Wertstromdesign, der Ansatz beschränkt sich auf die Darstellung des Ist-Zustands. Für diesen erweitern die Autoren den Informationsfluss; es bleibt jedoch offen, wie diese Erweiterung genutzt werden soll. Die erweiterte Darstellung des Ist-Zustands berücksichtigt auch in diesem Ansatz nicht die Termintreue.

### 2.5.5 Value Network Mapping

Khaswala und Irani haben eine erweiterte Form der Wertstromanalyse für eine Werkstattfertigung, das „Value Network Mapping“, entwickelt [Khas01]. Ihr Hauptaugenmerk liegt auf der Visualisierung komplexer Materialflüsse, die in der linearen Variante der klassischen Wertstromanalyse nicht dargestellt werden können. Ihr Ansatz beruht auf der systematischen Einbeziehung der eigens entwickelten Software *PFAST* (Production Flow Analysis and Simplification Toolkit), die eine Reihe von Materialflussanalysen und Werkzeugen zur Gruppierung von Produkten beinhaltet [Khas01, S. 5]. Durch die konsequente Einbindung von EDV-gestützten Methoden gelingt die Wertstromdarstellung auch für komplexe Materialflüsse.

Das Verfahren ist ausschließlich auf die Materialflussdarstellung fokussiert. Es stellt weder in der Zielgrößenerfassung noch in der Konfiguration eine Erweiterung zur klassischen Methode dar. Zudem ist die Methode auf eine Reihe von Software-Werkzeugen angewiesen, die in dieser speziellen Form nicht in jedem Unternehmen vorliegen.

### 2.5.6 Value Stream Engineering

Das Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO hat mit dem Wertstrom-Engineering eine sehr umfangreiche Methode entwickelt, die eine Anpassung der klassischen Wertstrommethode an verschiedene Szenarien erlaubt. Neben der Fertigung werden verschiedene vorgelagerte Bereiche, wie bspw. die Disposition oder der Vertrieb in die Wertstrombetrachtung eingebunden [Spat10, S. 87]. Ferner wird im Wertstrom-Engineering die Steuerungslogik der klassischen Wertstrommethode erweitert: So werden weitere Materialbereitstellungsverfahren wie etwa Milk Runs oder die Just-In-Sequence-Bereitstellung ergänzt. Die Symbolik wurde dementsprechend ebenfalls umfassend erweitert. Die sogenannte *Engineering Notation* erlaubt es, mehrere Wertströme in einer Abbildung darzustellen und zur Unterscheidung von Prozessarten (wertschöpfende, planende und logistische Prozesse) Farben einzusetzen [Spat10] [Hämm10].

Das Wertstrom-Engineering ist zwar sehr umfassend und eine wichtige Ergänzung der klassischen Wertstrommethode, es nimmt jedoch weder die Termintreue noch ihre Regelgrößen auf und lässt sich aufgrund der fehlenden Standardkonfiguration auch nicht in einem eintägigen Workshop umsetzen.

### 2.5.7 Engineer-to-Order VSM

Thomassen, Alfnes und Gran schlagen einen neuen Ansatz der Wertstrommethode für Unternehmen mit einer kundenspezifischen Einmalfertigung (Engineer-to-order) vor [Thom15]. Die kundenspezifische Einmalfertigung ist die Extremform der Auftragsfertigung, in der jeder eingehende Kundenauftrag die Konstruktion und Entwicklung des Unternehmens involviert. Dies ist typischerweise im Anlagen- und Schiffsbau der Fall.

Das Vorgehen beinhaltet zehn Schritte, die sich an der klassischen Wertstrommethode von Rother und Shook orientieren, und um für Einmalfertiger relevante Punkte ergänzt sind [Thom15, S. 209ff.]:

1. Auswahl einer Produktfamilie
2. Identifizierung des kritischen Pfads im Wertstrom
3. Identifizierung des Kundenentkopplungspunkts
4. Zeichnung des kritischen Wertstrompfads
5. Bestimmung der mittleren Taktzeit
6. Entwicklung einer kontinuierlichen Fließfertigung
7. Festlegung des Kundenentkopplungspunkts
8. Anwendung von Pull-Systemen, wenn keine Fließfertigung möglich ist
9. Festlegung eines Schrittmacher-Prozesses
10. Ausgleich des Produktionsmix'
11. Ausgleich des Produktionsvolumens

Die Schritte können in eine Wertstromanalyse (Schritte 1-5) und ein Wertstromdesign (Schritte 6-11) unterteilt werden. Die Analyse wird durch eine Reihe von Werkzeugen und Vorgaben erweitert, die bspw. die Auswahl einer Produktfamilie ermöglichen oder bei der Identifizierung des kritischen Pfads unterstützen. Das Vorgehen zur Identifizierung des kritischen Pfads ist angelehnt an den in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Ansatz von Stamm und Neitzert (vgl. [Stamm08]). Das Wertstromdesign ist bis auf wenige Details den Leitlinien der klassischen Methode sehr ähnlich. Der Schwerpunkt liegt auch hier auf Supermarkt-Systemen, die allerdings nur für verbaute Standardkomponenten anwendbar sind, und der durch FIFO-Bahnen unterstützten Fließfertigung. Die Umsetzung der einzelnen Leitlinien ist jeweils angepasst an Auftrags- bzw. Einmalfertiger. Die Wirksamkeit der Methode konnte bisher allerdings noch nicht in der Praxis validiert werden.

## 2.6 Fazit

Die vorgestellten Varianten der Wertstrommethode sind vielfältig, jedoch nur teilweise in der industriellen Praxis verbreitet. Allen Ansätzen ist gemein, dass sie Defizite für den Einsatz in der Auftragsfertigung aufweisen. Dieser Abschnitt fasst die bestehenden Defizite der vorgestellten Verfahren kurz zusammen, leitet einen Forschungsbedarf ab und formuliert anschließend Anforderungen an eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger.

### 2.6.1 Zusammenfassung der Defizite

Die Wertstrommethode in ihrer ursprünglichen Form weist für die Anwendung in der Auftragsfertigung einige Defizite auf. Dies betrifft in der Analysephase einerseits das generelle Vorgehen, das die Auswahl und Darstellung einer Produktfamilie vorsieht, sowie die unvollständige Aufnahme der logistischen Zielgrößen und Fertigungssteuerungsinformationen. Das gesamte Wertstromdesign ist stark auf eine Lagerfertigung ausgelegt, da ein zentrales Designelement die Kanban-Steuerung ist. Die Verbesserung der Termintreue steht nicht im Fokus des Wertstromdesigns.

Allen Erweiterungen der Wertstrommethode ist gemeinsam, dass die Termintreue weder explizit in einer Analyse aufgenommen noch in einer Designphase aktiv beeinflusst werden soll. Einige der Verfahren verzichten sogar vollständig auf das Wertstromdesign (*Job Shop VSM*). Die meisten Verfahren behandeln die höhere Materialflusskomplexität in der Auftragsfertigung und sind damit in der Anwendung sehr aufwendig. Sowohl in der Analyse- als auch in der Designphase übernehmen die Ansätze oftmals die ursprünglichen Leitlinien. Die Komplexität der Verfahren nimmt zu, weil sie wie bspw. das *Value Network Mapping* (vgl. Abschn. 2.5.5) oder das *Engineer-to-order VSM* (vgl. Abschn. 2.5.7) eine Reihe von statistischen (Software-)Werkzeugen voraussetzen und ohne diese kaum anwendbar sind. Ein Teil der Ansätze geht mit einem sehr großen zeitlichen Aufwand einher. Dies gilt insbesondere für Verfahren, die auf eine iterative Durchführung setzen, ohne ein klares Abbruchkriterium zu besitzen (*Improved VSM*, Abschn. 2.5.2), oder wie das *Manufacture-to-order VSM* (Abschn. 2.5.3) eine Echtzeitverfolgung der Aufträge vorschlagen, um deren Durchlaufzeit zu bestimmen.

Abb. 2-8 zeigt den Forschungsbedarf anhand der Kriterien *Methodenaufwand* und *vollständige Unterstützung logistischer Zielgrößen* der bestehenden Verfahren. Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das sich durch einen geringen Anwendungsaufwand auszeichnet und alle relevanten Zielgrößen einer Auftragsfertigung unterstützt.

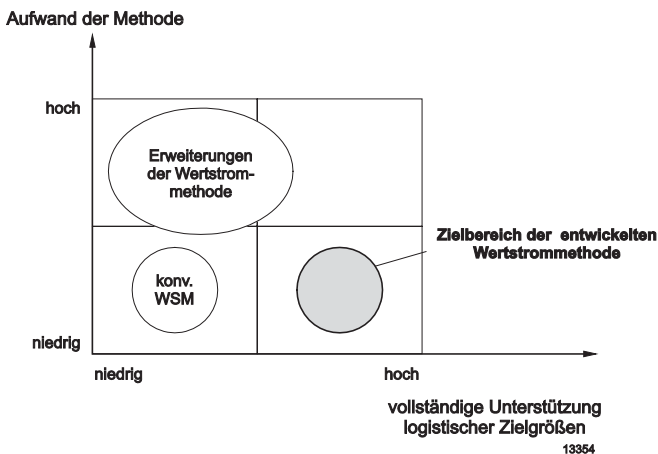


Abb. 2-8: Zielbereich der entwickelten Methode

### 2.6.2 Anforderungen an eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger

Aus den Defiziten der bestehenden Verfahren lassen sich Anforderungen an eine Wertstrommethode ableiten. Diese sind in verschiedene Kategorien unterteilt und orientieren sich an der Zielsetzung dieser Arbeit.

#### Terminorientierung

Auftragsfertiger vereinbaren mit ihren Kunden neben technischen Spezifikationen und Preisen auch Lieferzeiten für ihre Produkte. Die vereinbarten Lieferzeiten einzuhalten, ist eine der größten logistischen Herausforderungen für diese Unternehmen und eine Möglichkeit, sich im Wettbewerb zu profilieren. Für eine hohe Liefertreue ist es notwendig, schon in der Produktion eine hohe Termintreue zu erreichen. In einer Wertstromanalyse für Auftragsfertiger sollte es daher möglich sein, neben der Durchlaufzeit und dem Bestand auch die Termintreue in einem Fertigungsrundgang zu erfassen. Die Ermittlung der Termintreue soll, analog zur Durchlaufzeit, an die Erfassung von Einflussgrößen geknüpft sein.

#### Allgemeingültigkeit

Die Methode soll es ermöglichen, verschiedene Formen der Auftragsfertigung zu analysieren und anschließend einen Soll-Zustand abzuleiten. Den Schwerpunkt bilden damit Unternehmen mit hoher Produktvarianz und geringer Auflagehöhe und Wiederholhäufigkeit. Häufig sind diese Unternehmen in der Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip or-

ganisiert, d.h. gleichartige Arbeitssysteme sind zu Werkstätten zusammengefasst. Das Verfahren soll zudem branchenübergreifend einsetzbar sein. Der Ist-Zustand eines Systems soll unabhängig von Branche und Komplexität mit verträglichem Aufwand darstellbar sein. Dies gilt auch für die zweite Phase der Methode: Das Wertstromdesign soll in möglichst vielen Unternehmen einen messbaren Effekt auf die logistischen Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit und Bestand ermöglichen.

### **Praxistauglichkeit**

Für die Praxistauglichkeit ist es entscheidend, dass Anwender und Entscheidungsträger das Verfahren verstehen können. Der Anwender sollte die Methode leicht erlernen und eigenständig durchführen können. Für den Entscheidungsträger, der auch Anwender sein kann, muss das Ergebnis zum einen in der Darstellung intuitiv sein. Andererseits sollen auch die identifizierten Handlungsfelder für die Produktionsplanung und -steuerung so nachvollziehbar sein, dass das vorgeschlagene Wertstromdesign auch im Unternehmen angestoßen wird. Das Wertstromdesign selbst soll möglichst verständlich sein, da einfache Methoden die Akzeptanz im Unternehmen und damit die Umsetzungswahrscheinlichkeit erhöhen [Lödd16, S. 104]. Einfache Verfahren verringern darüber hinaus den Schulungsaufwand und daraus resultierende Mehraufwände und Kosten.

### **Orientierung an konventioneller Wertstrommethode**

Die zu entwickelnde Methode soll keinen Gegenentwurf zur konventionellen Wertstrommethode, sondern eine sinnvolle Erweiterung dieser darstellen. Die konventionelle Methode hat sich in der Praxis vielfach bewährt und weist einige Stärken auf, die sich auch in der Wertstrommethode für Auftragsfertiger wiederfinden sollen. Dazu zählen:

- Vor-Ort-Erfassung
- Art der Darstellung
- Hohe Anwenderfreundlichkeit

Die Vor-Ort-Erfassung ist eine der großen Stärke der Wertstromanalyse. Sie stellt sicher, dass bspw. die tatsächlichen Bestände an den Arbeitssystemen erfasst werden und der Anwender sich nicht auf Systemdaten verlassen muss, die stark von der Rückmeldequalität abhängig sind. Zudem stärkt die Aufnahme vor Ort das Problembewusstsein der Anwender, da Verschwendungen, wie bspw. hohe Bestände und damit verbundene Wartezeiten, direkt erlebt werden können. Im neuen Ansatz für Auftragsfertiger sollen die Daten ebenfalls so weit wie möglich in der Fertigung erfasst werden. Dies gilt insbesondere auch für die Termintreue und ihre Einflussgrößen.

Sowohl der Ist-Zustand als auch der Soll-Zustand werden in der konventionellen Wertstrommethode mit Hilfe einer standardisierten Symbolik dargestellt. In der Analyse können Verschwendungen und deren Ursachen so schnell erkannt und kommuniziert werden. Gleiches gilt für die Maßnahmen, die im Wertstromdesign ergriffen werden. Deren eingängige Symbolik zeigt die Wirkmechanismen auf und erleichtert somit die Kommunikation des Zielzustands. Der neue Ansatz soll die Art der Darstellung der konventionellen Wertstrommethode übernehmen. Die zu entwickelnde Symbolik soll sich an der vorhandenen Symbolik anlehnen und diese ggf. erweitern.

Die große Beliebtheit des Verfahrens in der industriellen Praxis ergibt sich aus seiner einfachen Anwendung bei gleichzeitig hoher Effektivität. Diese Kombination erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass das Verfahren vollständig angewendet wird. Das neue Verfahren soll daher ebenfalls Ungenauigkeiten, bspw. bei der Bestandsaufnahme, bewusst in Kauf nehmen, um eine einfache Anwendung zu gewährleisten.

### 3 Wertstromanalyse für Auftragsfertiger

Dieses Kapitel stellt in Abschnitt 3.1 zunächst die Ziele der Wertstromanalyse vor und leitet aus diesen Gestaltungsmerkmale für eine Wertstromanalyse ab. Anschließend beschreibt Abschnitt 3.2 die Vorgehensweise für eine Wertstromanalyse in der Auftragsfertigung. Abschnitt 3.3 führt Hilfsmittel zur Aufwandsreduzierung ein.

#### 3.1 Ziele der Wertstromanalyse und Ableitung von Gestaltungsmerkmalen

Zunächst formuliert dieser Abschnitt Ziele und Gestaltungsmerkmale der neu zu entwickelnden Wertstromanalyse. Da sich die Auftragsfertigung in wesentlichen Merkmalen von einer Lagerfertigung unterscheidet (vgl. Abschn. 2.1), werden sich auch Zielsetzung und Gestaltung der Wertstromanalyse für Auftragsfertiger von einer Wertstromanalyse für Lagerfertiger unterscheiden.

Es ergeben sich in Anlehnung an die Anforderungen an eine Wertstrommethode (Abschn. 2.6) folgende Teilziele für die neue Wertstromanalyse:

- Die Wertstromanalyse soll die Terminabweichung in einem Fertigungsrundgang erfassen.
- Die Wertstromanalyse soll die Durchlaufzeit und den Bestand in einer für Auftragsfertiger praktikablen Art erfassen.
- Die Wertstromanalyse soll für Auftragsfertiger Handlungsfelder aufdecken, die sich durch organisatorische Maßnahmen beheben lassen.
- Die Wertstromanalyse soll bei Unternehmen mit großer Produktvarianz und komplexen Materialflüssen anwendbar sein.
- Die Wertstromanalyse soll möglichst ohne großen zeitlichen Aufwand durchführbar sein; Ziel ist ein eintägiger Workshop.

Aus den genannten Zielen lassen sich Gestaltungsmerkmale für die Wertstromanalyse ableiten:

- Der Methodenanwender soll mit der Wertstromanalyse die Fertigungssituation innerhalb eines einmaligen Fertigungsrundgangs erfassen. Die Analyse ist als Blitzlicht zu gestalten und soll die logistischen Zielgrößen nicht in Form einer Momentenstudie erfassen.
- Die Erfassung soll so gestaltet sein, dass sich im Anschluss an die Datenaufnahme die Wertströme möglichst aller im Bereich gefertigten Produkte erstellen lassen. Datenaufnahme und Visualisierung des Wertstroms sind daher als separate Schritte

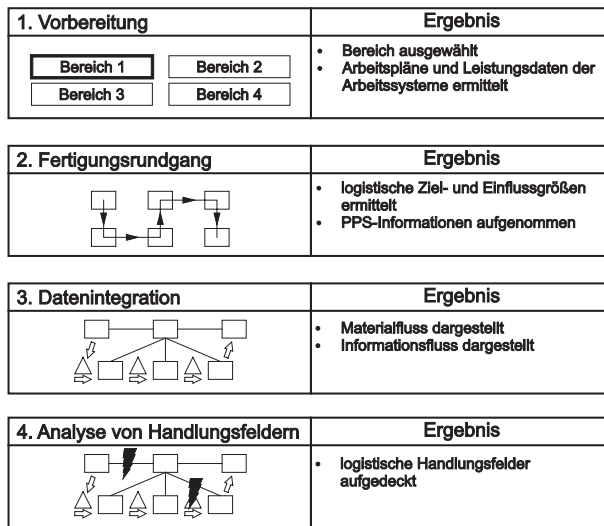
te durchzuführen. In der Aufnahme sollen zudem alle Arbeitssysteme des Bereichs erfasst werden.

- Die konventionelle Methode und ihre Symbolik haben sich in der Praxis etabliert und werden durch zahlreiche Hilfsmittel, wie bspw. Magnet- oder Stickersets, in der praktischen Anwendung unterstützt. Die Symbolik soll daher übernommen und – wo notwendig – sinnvoll erweitert werden, um die Anwendung möglichst einfach und intuitiv zu gestalten.
- Vereinfachungen in der Datenaufnahme werden bewusst in Kauf genommen, um die Anwendungswahrscheinlichkeit des Verfahrens zu erhöhen. Grundsätzlich bieten sich in der Datenaufnahme zwei Basiseinheiten für die logistischen Zielgrößen an: *Vorgabestunden* und *Anzahl Aufträge*. Bei einer ausreichend großen Anzahl an Aufträgen in der Fertigung soll die Einheit *Anzahl Aufträge* vorgezogen werden, um den Verfahrensaufwand möglichst gering zu halten.

### 3.2 Erläuterung des Vorgehens

Dieser Abschnitt stellt das Vorgehen der Wertstromanalyse für Auftragsfertiger vor. Das Vorgehen muss zum einen die hohe Produktvarianz in der Auftragsfertigung berücksichtigen und zum anderen mit geringem zeitlichem Aufwand durchführbar sein. Das Vorgehen weist daher einige Abweichungen zur konventionellen Methode auf und ist in vier Schritte gegliedert (Abb. 3-1):

1. In der Vorbereitung wird anstelle einer Produktfamilie ein zu untersuchender Bereich ausgewählt. Statt einer Kundenbedarfsanalyse zur Ermittlung des Kundenkontakts werden die Leistungsdaten der Arbeitssysteme im Bereich bestimmt.
2. Da nicht eine spezifische Produktfamilie untersucht wird, sondern ein kompletter Fertigungsbereich, sind alle Arbeitssysteme des Bereichs von Interesse. Im Fertigungsrundgang werden daher die Informationen aller Arbeitssysteme erhoben.
3. Die Wertstromkarte soll weiterhin für ein Produkt erstellt werden, da dies sehr anschaulich den Durchlauf (inklusive Durchlaufzeit) eines realen Produkts abbildet. Die Anwender erstellen die Wertstromkarte jedoch nicht während des Rundgangs, sondern erst im Anschluss an diesen in der Stufe der Datenintegration.
4. Abschließend werden logistische Handlungsfelder im Wertstrom des Produkts aufgedeckt. Diese gezielte Analyse soll durch Leitfragen unterstützt werden.



13355

Abb. 3-1: Vierstufiges Vorgehen in der Wertstromanalyse

### 3.2.1 Vorbereitung

Ziel der Vorbereitung zur Wertstromanalyse ist es, den zu untersuchenden Fertigungsbe-  
 reich auszuwählen und die für den Fertigungsrundgang notwendigen Daten bereitzustel-  
 len. Dies sind die Arbeitspläne der im Bereich gefertigten Produkte und die Leistungs-  
 kennzahlen aller Arbeitssysteme im Bereich.

#### Schritt 1: Auswahl eines Fertigungsbereichs

Im ersten Schritt der Vorbereitung ist zunächst ein abgegrenzter Bereich zu bestimmen,  
 der mit der Wertstromanalyse untersucht werden soll. In vielen kleinen und mittleren Un-  
 ternehmen kann die gesamte Produktion untersucht werden, weil die Anzahl der Arbeits-  
 systeme überschaubar ist. Ab einer bestimmten Unternehmensgröße ist es jedoch nicht  
 mehr möglich, die gesamte Fertigung mit der Wertstromanalyse zu untersuchen. Es muss  
 daher ein Bereich für die Analyse ausgewählt werden.

Die Fokussierung auf einen organisatorisch abgetrennten Bereich bietet für die Wert-  
 stromanalyse und für das Wertstromdesign folgende Vorteile:

- Die Datenaufnahme kann in einem eintägigen Workshop erfolgen.
- Das Wertstrom-Team kann leichter zusammengestellt werden.

- Auftretende Hindernisse bzw. Schwierigkeiten bei der Aufnahme oder der Umsetzung können aufgenommen werden, um daraus einen Erkenntnisgewinn für spätere Wertstromprojekte abzuleiten.
- Das Wertstromdesign kann in einem abgeschlossenen Bereich schneller umgesetzt werden.
- Der Bereich kann als Pilotumgebung dienen, in welcher die Wirksamkeit der Methoden auf die logistischen Zielgrößen nachgewiesen wird.

Die Auswahl eines Bereichs sollte sich an der strategischen Zielsetzung des Unternehmens orientieren. Möchte sich das Unternehmen bspw. durch eine hohe Liefertreue auszeichnen, während Kapitalbindungskosten und Lieferzeit von untergeordneter Bedeutung sind, ist die Termintreue bzw. die Terminabweichung der einzelnen Bereiche zu bewerten. In den allermeisten Fällen werden die Methodenanwender wissen, welcher Bereich einen besonders hohen Handlungsbedarf aufweist, sodass häufig kein formalisiertes Vorgehen notwendig ist.

Der Auswahlprozess kann jedoch durch ein formalisiertes Vorgehen unterstützt werden, wenn bspw. die Praktiker unsicher sind oder sich nicht auf einen Bereich einigen können. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen erlaubt es, auf Basis von Rückmeldedaten Unternehmensbereiche mit unzureichender Termintreue und langen Auftragsdurchlaufzeiten zu identifizieren und zu priorisieren. Das Vorgehen ist in drei Schritte gegliedert:

### *1. Abschätzung eines Erfassungszeitraums für die Rückmeldedaten*

Der Erfassungszeitraum der Rückmeldedaten sollte etwa dem doppelten bis dreifachen der mittleren Auftragsdurchlaufzeit entsprechen [Wien97, S. 187]. Die mittlere Auftragsdurchlaufzeit ist entweder bekannt oder kann abgeschätzt werden, indem der Auftragsbestand durch die Leistung der Produktion geteilt wird.

### *2. Bestimmung notwendiger Rückmeldedaten*

Die Auftragsdurchlaufzeit errechnet sich aus der Differenz von Ist-End- und Ist-Starttermin eines Auftrags. Die Terminabweichung ergibt sich aus den Plan-End- und Ist-Endterminen der Aufträge. Die entsprechenden Termini sind daher je Auftrag für die Auswertung der Auftragsdurchlaufzeiten und Terminabweichungen zu bestimmen. Für die Gewichtung eines Bereichs ist darüber hinaus von Interesse, wie viele Aufträge dieser im Betrachtungszeitraum bearbeitet.

### *3. Auswertung der Rückmeldedaten*

Aus den Daten lassen sich je Bereich die mittleren Auftragsdurchlaufzeiten und Terminabweichungen bestimmen und eine Rangfolge der Fertigungsbereiche ableiten. Da die

Terminabweichung sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann und diese sich bei der Mittelwertbetrachtung aufheben, sollten die Mittelwerte der Terminabweichungsbeträge bestimmt werden [Kuyu13, S. 133]. Für die Rangfolge werden die Mittelwerte der Bereiche jeweils mit der Anzahl der Aufträge gewichtet und können anschließend nach Größe sortiert werden. Tab. 3-1 zeigt eine solche Rangfolge für ein Beispiel-Unternehmen. Die Sortierung erfolgt hier nach dem Anteil des Bereichs an der Terminabweichung, sodass die *Mechanische Fertigung* die höchste Priorität besitzt. Bei einer Sortierung nach der Durchlaufzeit ergäbe sich die höchste Priorität für die *Elektronische Fertigung*.

Tab. 3-1: Auswahl eines zu untersuchenden Fertigungsbereichs

Fertigungsbereich	ZDA <sub>n</sub> [BKT]	[TAA] <sub>n</sub> [BKT]	AnzA [-]	[TAA] <sub>n</sub> · AnzA	ZDA <sub>n</sub> · AnzA
Mechanische Fertigung	8,4	5,2	534	2777	4486
Kunststofffertigung	6,1	2,8	676	1893	4124
Elektronische Fertigung	11,7	2,0	463	926	5417
Sägen	2,3	1,4	624	869	1435

## Schritt 2: Bereitstellung von Eingangsgrößen

Der nächste Schritt der Vorbereitung beinhaltet die Bereitstellung von Daten, die für die Wertstromerstellung notwendig sind und nicht in einem Fertigungsrundgang erhoben werden können. Die zentrale Eingangsgröße für die Wertstromanalyse ist die Abgangsrate der Arbeitssysteme, die in einer Werkstattfertigung stark variieren können. Es ist daher notwendig, die Abgangsraten aller Arbeitssysteme zu bestimmen. Diese kann prinzipiell in zwei unterschiedlichen Einheiten angegeben werden:

1. **Mittlere Leistung in Anzahl Aufträge  $LA_m$ :** Die mittlere Leistung ergibt sich in diesem Fall aus dem Quotienten aus der Anzahl aller gefertigten Aufträge und dem Bezugszeitraum.
2. **Mittlere Leistung in Vorgabestunden  $L_m$ :** Die mittlere Leistung ergibt sich aus dem Quotienten aus der geleisteten Arbeit in Vorgabestunden und der Länge des Bezugszeitraums.

Die mittlere Leistung sollte für alle Arbeitssysteme in derselben Einheit bereitgestellt werden. Die Wahl der Einheit ist prinzipiell beliebig, hat jedoch Auswirkungen auf den Fertigungsrundgang (Schritt 2): Die Einheit des im Rundgang aufzunehmenden Bestands muss mit der Einheit der mittleren Leistung kompatibel sein. Wird die mittlere Leistung in Vorgabestunden vorgegeben, erfordert dies eine Erfassung des Bestands in Vorgabestunden. D.h., dass für jeden Auftrag die Auftragszeit bestimmt werden muss. Aus Auf-

wandsgründen ist daher die Einheit *Anzahl Aufträge* zu bevorzugen, da sie im Fertigungsrundgang lediglich das Zählen der vorliegenden Aufträge erfordert. Die Erfassung von mittlerer Leistung und mittlerem Bestand in der Einheit *Vorgabestunden* ist immer dann von Vorteil, wenn die die Auftragszeiten an den Arbeitssystemen sehr stark streuen.

Bei der Bestimmung der Leistungskennzahlen ist zu beachten, dass alle Aufträge unabhängig vom Produkt in die Leistungsbestimmung einfließen. Auch Änderungen im Schichtsystem innerhalb des betrachteten Zeitraums sind zu berücksichtigen. Wird die Leistung in Vorgabestunden bestimmt, ist zudem auch die mittlere Auftragszeit  $ZAU_m$  je Arbeitssystem zu bestimmen. Diese Größe gibt Aufschluss darüber, wie lange im Durchschnitt ein Auftrag am Arbeitssystem verweilt.

### **Schritt 3: Darstellung von Arbeitsplänen**

In der Auftragsfertigung ist die Fokussierung auf eine bestimmte Produktgruppe deutlich schwieriger als in einer Lagerfertigung, da es in der Regel nicht eine dominierende Produktgruppe gibt. Es sollen daher alle den Fertigungsbereich durchlaufenden Produkte als Wertstrom darstellbar sein. Dafür sollten die Arbeitspläne aller Produkte verfügbar gemacht werden. Dies gelingt in übersichtlicher Form mit einer Produkt-Arbeitssystem-Matrix. In dieser sind alle Arbeitsvorgänge angegeben, die für die Fertigung eines Produktes auf den entsprechenden Arbeitssystemen notwendig sind. Da auch diese Form der Darstellung bei einer sehr großen Produktvarianz sehr unübersichtlich werden kann, sollte der Umsetzung eine ABC-Analyse vorausgehen, welche die Produkte bspw. nach ihrer Beteiligung am Umsatz sortiert. Abb. 3-2 zeigt beispielhaft eine solche Matrix für eine Getriebefertigung. Die Darstellung in Matrixform bietet eine gute und kompakte Übersicht über die darzustellenden Produkte.

		Drehen			Verzähnen			Schleifen				Bohren			...			
		Drehen 1	Drehen 2	Drehen 3	Verzähnen 1	Verzähnen 2	Verzähnen 3	Verzähnen 4	Schleifen 1	Schleifen 2	Schleifen 3	Schleifen 4	Bohren 1	Bohren 2	Bohren 3	...	...	...
Schnecken- getriebe	Typ SchG 1		x					x		x			x					
	Typ SchG 2	x			x				x									
	...		x		x					x			x					
Stirnrad- getriebe	Typ StG 1	x				x					x			x				
	Typ StG 2	x				x					x				x			
	...			x		x					x			x				
Kegelrad- getriebe	Typ KG 1		x			x		x										
	Typ KG 2			x		x		x										
	...			x		x		x										
...	...																	

13062

Abb. 3-2: Beispielhafte Produkt-Arbeitssystem-Matrix

Die Darstellung aller Produkte in einer Matrix ist bei einer hohen Produktvarianz mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden. Dieser Schritt kann alternativ durch das Erfahrungswissen der Praktiker ersetzt werden. Diese kennen in der Regel die umsatzstarken Artikel und deren Arbeitspläne, sodass sie ein geeignetes Produkt auch ohne die Matrixdarstellung auswählen können. In der späteren Datenintegration kann dann zur Sicherheit der Arbeitsplan des ausgewählten Produkts hinzugezogen werden, um einen korrekten Materialfluss in der Wertstromkarte sicherzustellen.

### 3.2.2 Fertigungsrundgang

Die Wertstromanalyse erfordert im zentralen Schritt einen Fertigungsrundgang. Das Ziel ist es, möglichst viele Daten in einer vor-Ort-Datenerfassung aufzunehmen. Die Daten lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Arbeitssysteminformationen
- logistische Zielgrößen mit ihren Einflussgrößen
- Planungs- und Steuerungsinformationen

Die Daten werden an allen Arbeitssystemen des Fertigungsbereichs erhoben. Im Gegensatz zur klassischen Wertstrommethode folgt die Wertstromanalyse für Auftragsfertiger nicht dem Produktionsdurchlauf eines bestimmten Produkts. Die Reihenfolge der Arbeitssysteme im Fertigungsrundgang spielt daher nur eine untergeordnete Rolle. Für alle Daten wird erläutert, wie diese aufgenommen und anschließend dargestellt werden.

### **Schritt 1: Aufnahme von Arbeitssystemdaten**

Arbeitssystemdaten sind Daten, die ein Arbeitssystem eindeutig beschreiben und für die Erstellung der logistischen Zielgrößen notwendig sind. Einzelne Maschinen oder Arbeitsplätze bilden ein Arbeitssystem, wenn sie die gleichen Arbeitsprozesse durchführen können und eine gemeinsame Warteschlange besitzen.

Zu den Arbeitssystemdaten gehören

- die Arbeitssystemkennung,
- die Anzahl der Einzelmaschinen oder Arbeitsplätze, aus denen ein Arbeitssystem besteht,
- die Anzahl der Mitarbeiter, die an dem Arbeitssystem beschäftigt sind, und
- das am Arbeitssystem vorliegende Schichtsystem.

Die Arbeitssystemkennung ist notwendig, um das Arbeitssystem eindeutig zu identifizieren. Aus der Anzahl der Mitarbeiter und der Anzahl der Maschinen je Arbeitssystem lässt sich die Kapazitätsreserve des Arbeitssystems bestimmen. Zusammen mit dem Schichtsystem ergibt sich die verfügbare Betriebsmittelkapazität, mit der sich die Auftragszeit (in Vorgabestunden) eines Fertigungsauftrags in die eigentliche Durchführungszeit (in Betriebskalendertage) umwandeln lässt.

### **Darstellung der Arbeitssystemdaten**

Die Darstellung des Arbeitssystems mit seinen spezifischen Informationen erfolgt als Prozesskasten. In den Prozesskasten werden die Anzahl der Arbeitsplätze und die am Arbeitssystem beschäftigten Mitarbeiter eingetragen. Die Arbeitsplätze sind durch einen senkrecht stehenden Prozesskasten und die Mitarbeiter durch einen stilisierten Kopf mit Armen symbolisiert. Die Leistungskennzahl, die mittlere Auftragszeit (wenn ausgewertet) und das Schichtsystem werden unter dem Prozesskasten notiert (vgl. Abb. 3-3).

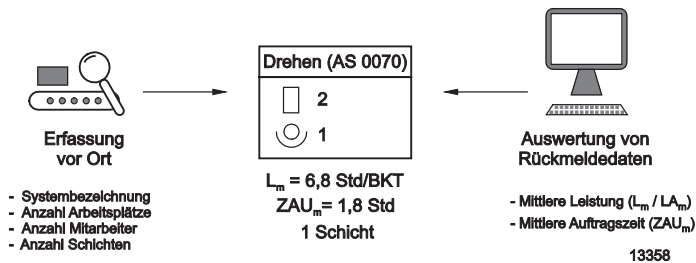


Abb. 3-3: Notwendige Arbeitssystemdaten

### Schritt 3: Aufnahme logistischer Zielgrößen

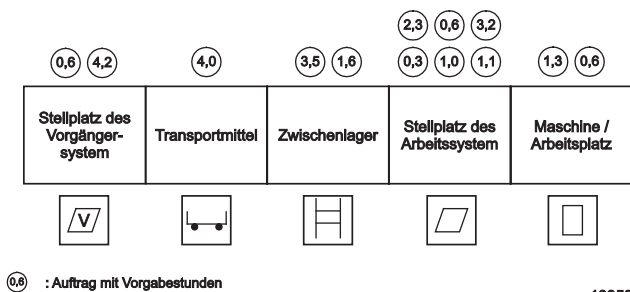
Der nächste Schritt beinhaltet die Aufnahme der logistischen Zielgrößen im Fertigungsrundgang. Abschnitt 2.2 beschreibt die Modellierung logistischer Zielgrößen, die als Grundlage für die Datenaufnahme dient. Folgende Größen werden in dem Fertigungsrundgang erfasst:

- Bestand
- Durchlauf- und Durchführungszeit
- Rückstandsbedingte Terminabweichung
- Reihenfolgedisziplin

#### Aufnahme des Bestands

Zum Bestand eines Arbeitssystems zählen Aufträge, die zum Zeitpunkt des Rundgangs auf die Bearbeitung an diesem System warten oder an diesem bearbeitet werden. Es werden alle Aufträge unabhängig von ihrer Produktfamilie erfasst.

Bei der Aufnahme des Bestands ist zu beachten, dass der Bestand nicht immer physisch am Arbeitssystem vorliegt. Generell gilt, dass ein Auftrag einem System zuzurechnen ist, sobald er vom Vorgängersystem abgeschlossen wird. Es ergeben sich für den Auftragsbestand eines Arbeitssystems im Allgemeinen fünf mögliche Standorte (Abb. 3-4). Mit der Fertigstellung am Vorgängersystem kann ein Auftrag an diesem noch prozessbedingt liegen. Auch zwischengelagerte Aufträge, die im nächsten Arbeitsschritt an das betrachtete Arbeitssystem gelangen, sowie Aufträge, die sich während des Rundgangs auf einem Transportmittel befinden, sind in die Bestandsbilanz des Systems einzubeziehen. Am betrachteten System selbst warten die Aufträge entweder am Stellplatz oder befinden sich auf dem System zur Bearbeitung.



13359

Abb. 3-4: Bestandsorte mit Symbolik an einem beispielhaften Arbeitssystem

Der Bestand eines Arbeitssystems kann generell in zwei Dimensionen erfasst werden:

1. **Anzahl Aufträge:** In diesem Fall wird die Anzahl der vorliegenden Aufträge gezählt – unabhängig von ihrem Arbeitsvolumen. Am Beispielsystem befindet sich entsprechend ein Bestand von 13 Aufträgen.
2. **Vorgabestunden:** In diesem Fall wird der Bestand ermittelt, indem die Auftragszeiten (Vorgabestunden) der vorliegenden Aufträge aufsummiert werden. Im Beispiel beträgt der Bestand 20,3 Std.

Die Aufnahme der Vorgabestunden je Auftrag ist an die Bedingungen gekoppelt, dass für den jeweiligen Arbeitsvorgang Vorgabezeiten existieren und diese in der Fertigung identifiziert werden können. Können die Vorgabestunden nicht direkt ermittelt werden, da sie bspw. nicht auf den Auftragsbegleitpapieren verzeichnet sind, sollte auf die Aufnahme der Auftragszeiten verzichtet werden. Der Vorteil von Vorgabestunden ist, dass sie direkt das Arbeitsvolumen des Auftrags widerspiegeln. In der kundenspezifischen Auftragsfertigung können sich die Arbeitsvolumina von Fertigungsaufträgen aufgrund variierender Losgrößen und Arbeitsinhalte stark unterscheiden. Wird nur die Anzahl der Aufträge als Bestand erfasst, kann dasselbe Bestandsniveau unterschiedliche Arbeitsvolumina bedeuten.

### Darstellung des Bestands

Da sich in der Einzel- und Kleinserienfertigung häufig sehr viele Aufträge in der Fertigung befinden, wird in der Darstellung des Wertstroms aus Gründen der Übersichtlichkeit darauf verzichtet, einzelne Fertigungsaufträge individuell abzubilden. Stattdessen werden sie zusammengefasst und durch ein Bestandsdreieck symbolisiert, das aus der konventionellen Wertstrommethode bereits bekannt ist. Unter das Dreieck wird, wie in diesem Beispiel, die Anzahl der Aufträge oder die Summe der Vorgabestunden eingetragen. Optional kann der genaue Ort des Bestands angegeben werden (vgl. Abb. 3-5).

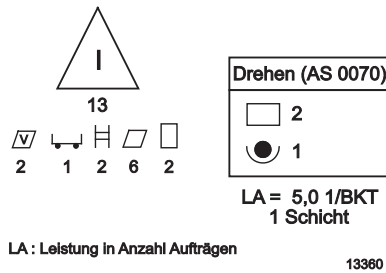


Abb. 3-5: Darstellung des Bestands in der Wertstromkarte

### Aufnahme der Durchlauf- und Durchführungszeit

Aus dem Bestand und aus den zuvor aufgenommenen Arbeitssystemdaten lassen sich nun zwei wichtige Zeitgrößen für ein Arbeitssystem bilden: Die mittlere Durchlaufzeit gibt an, wie lange ein Auftrag im Durchschnitt am betrachteten Arbeitssystem verweilt. Die Durchlaufzeit eines Arbeitssystems ergibt sich aus dem Quotienten aus dem Bestand und der Abgangsrate eines Systems (vgl. Gleichung 2-5). In der Wertstromanalyse kann jedoch kein mittlerer Bestand, sondern nur der Bestand zum Zeitpunkt der Datenaufnahme erfasst werden. Für das Beispielsystem heiße das:

$$ZDL_m \approx \frac{BA(T_0)}{LA_m} = \frac{13}{5} = 2,6 \text{ BKT} \quad 3-1$$

- $ZDL_m$  : mittlere Durchlaufzeit des Systems [BKT]  
 $BA(T_0)$  : Bestand zum Aufnahmezeitpunkt in Anzahl Aufträgen [-]  
 $LA_m$  : mittlere Leistung des Systems in Anzahl Aufträgen [1/BKT]

Da sich die mittlere Durchlaufzeit in diesem Fall aus dem Bestand zu einem zufälligen Zeitpunkt und einer mittleren Leistung ergibt, enthält sie gegenüber Gleichung 2-5 eine gewisse Unschärfe.

Wie lange ein Arbeitssystem von einem Auftrag belegt wird gibt die Durchführungszeit an. Diese Kennzahl wird ebenso wie die Durchlaufzeit in Betriebskalendertagen angegeben, und ergibt sich aus dem Quotienten von Auftragszeit und maximal möglicher Leistung. Die maximal mögliche Leistung kann in der Regel mit ausreichender Genauigkeit durch die Kapazität approximiert werden. In diesem Fall wird die mittlere Auftragszeit durch die im vorliegenden Schichtsystem verfügbare Kapazität geteilt [Nyhu12, S. 20f.]:

$$ZDF_m = \frac{ZAU_m}{KAP} = \frac{1,8 \text{ Std}}{7,5 \text{ Std/BKT}} = 0,2 \text{ BKT} \quad 3-2$$

- $ZDF_m$  : mittlere Durchführungszeit des Systems „Drehen“ [BKT]  
 $ZAU_m$  : mittlere Auftragszeit des Systems „Drehen“ [Std]  
 $KAP$  : Kapazität des Systems „Drehen“ [Std/BKT]

Alternativ, wenn die mittlere Auftragszeit nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand bestimmt werden kann, ist folgende Abschätzung möglich:

$$ZDF_m = \frac{1}{LA_m} = \frac{1}{5,0 \text{ 1/BKT}} = 0,2 \text{ BKT} \quad 3-3$$

- $ZDF$  : mittlere Durchführungszeit des Arbeitssystems [BKT]  
 $LA_m$  : mittlere Leistung des Arbeitssystems in Anzahl Aufträgen [-]

Nachteilig an Gleichung 3-3 ist, dass bei einer geringen Auslastung die Durchführungszeit überschätzt wird. Bei einer Auslastung kleiner als 100 % ist die mittlere Leistung kleiner als die maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems [Nyhu12, S. 27].

### **Darstellung der Durchlauf- und Durchführungszeit**

Die Darstellung beider Größen erfolgt nach dem aus der konventionellen Wertstrommethode bekannten Muster. Unter das Bestandsdreieck und das Arbeitssystem wird eine Zeitlinie gezogen. Auf dem erhöhten Teil unter dem Bestand wird die Durchlaufzeit eingetragen, während die Durchführungszeit auf dem unteren Teil die Wertschöpfungszeit aus der konventionellen Methode ersetzt (Abb. 3-6).

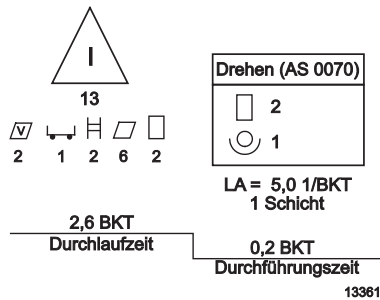


Abb. 3-6: Prozess mit Bestandsdreieck und Zeitgrößen

### Aufnahme der Reihenfolgedisziplin

Um die Reihenfolgedisziplin in einem Fertigungsrundgang zu erfassen, muss der Anwender eine ausreichend große Anzahl an Reihenfolgeentscheidungen beobachten. Die Vorgabezeiten von Aufträgen sind häufig so groß, dass es in einer Wertstromanalyse meist nicht möglich ist, mehrere Auftragswechsel an einem Arbeitssystem abzuwarten. Es ist jedoch möglich, die Aufträge zu bewerten, die während des Rundgangs auf den Arbeitssystemen bearbeitet werden. Ist dies der jeweils dringlichste Auftrag, so kann die Reihenfolgeentscheidung als richtig bewertet werden. Die Dringlichkeit eines Auftrags wird durch den Plan-Rang ausgedrückt. Zur Bestimmung des Plan-Rangs werden die Aufträge nach ihren Plan-Endterminen anhand des olympischen Prinzips sortiert (Abb. 3-7).

Auftrag	Plan-Termin	Plan-Rang
FA1001	23.03.2017	1
FA1002	25.03.2017	2
FA1003	25.03.2017	2
FA1004	26.03.2017	4
FA1005	27.03.2017	5
...	...	...
FA1013	07.04.2017	13

13362

Abb. 3-7: Auftragsliste mit Plan-Rängen

Da im Zeitraum zwischen der Auswahl eines Auftrags und dem Fertigungsrundgang theoretisch noch ein dringlicherer Auftrag dem Arbeitssystem zugehen kann, werden auch Aufträge mit dem zweithöchsten Plan-Rang als richtige Reihenfolgeentscheidung bewertet. Besteht ein Arbeitssystem aus mehreren Arbeitsplätzen bzw. Maschinen, können theoretisch auch mehrere Reihenfolgeentscheidungen pro Arbeitssystem bewertet werden. Die

Reihenfolgedisziplin für den untersuchten Bereich ergibt sich dann zu (i.A. [Lödd16, S. 522]):

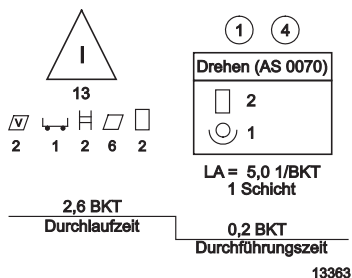
$$RD = \frac{\text{Anz}A_{\text{bearb}} \text{ mit } \text{Anz}\ddot{U}A \leq 1}{\text{Anz}A_{\text{bearb}}} \quad 3-4$$

- RD* : Reihenfolgedisziplin [%]
- AnzA<sub>bearb</sub>* : Anzahl der in Bearbeitung befindlichen Aufträge [-]
- AnzÜA* : Anzahl übergangener Aufträge [-]

### Darstellung der Reihenfolgedisziplin

Die Darstellung der Reihenfolgedisziplin erfolgt in zwei Formen: Zum einen in der Wertstromkarte selbst und zum anderen als separates Histogramm, das die Plan-Ränge aller Aufträge in Bearbeitung dargestellt.

In der Wertstromkarte wird die Reihenfolgedisziplin an den Arbeitssystemen thematisiert, indem die in Bearbeitung befindlichen Aufträge mit ihren Plan-Rängen als Kreise auf dem Prozesskasten abgebildet werden. Am Beispiel-Arbeitssystem werden zwei Aufträge bearbeitet (Abb. 3-8). Zum einen der Auftrag mit dem Plan-Rang „1“ und zum anderen der Auftrag mit dem Plan-Rang „4“. Der Letztere hat demzufolge zwei Aufträge übergangen.



**Abb. 3-8:** Arbeitssystem mit Plan-Rängen der Aufträge in Bearbeitung

Ergänzend werden für den betrachteten Fertigungsbereich alle in Bearbeitung befindlichen Aufträge mit ihren Plan-Rängen in ein Histogramm eingetragen. Die zwei Aufträge vom Beispiel-Arbeitssystem finden sich entsprechend gekennzeichnet mit ihren Plan-Rängen wieder. In diesem Fall wurden bei insgesamt 29 Aufträgen 24 richtige Entscheidungen getroffen. Die graphische Darstellung erlaubt eine schnelle Erfassung und Interpretation der Reihenfolgedisziplin in der Fertigung. In diesem Fall halten sich die Mitar-

beiter überwiegend an die vorgegebene Reihenfolge und es existieren nur wenige Ausreißer.

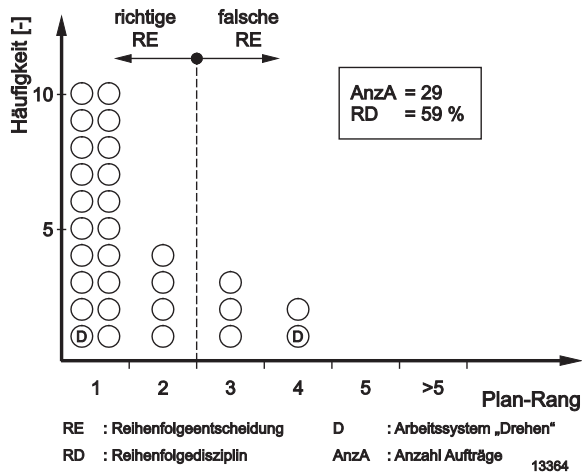


Abb. 3-9: Diagramm zur Veranschaulichung der Reihenfolgedisziplin

Die obige Form der Darstellung bietet den Vorteil, dass die Reihenfolgedisziplin und die Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen (vgl. Abschn. 2.2.3) miteinander kombiniert werden. Generell wird zwar die Reihenfolgedisziplin überschätzt, aus dem Histogramm lässt sich jedoch bspw. ablesen, ob es an einzelnen Arbeitssystemen Tendenz zu größeren Reihenfolgeabweichungen gibt.

### Aufnahme der rückstandsbedingten Terminabweichung

Die Regelgrößen der Termintreue sind die Reihenfolgeabweichung und der Rückstand. Die Reihenfolgeabweichung kann nach dem zuvor gezeigten Vorgehen über die Reihenfolgedisziplin bestimmt werden. Der Rückstand eines Arbeitssystems lässt sich nicht direkt am Arbeitssystem aus dem vorliegenden Umlaufbestand erfassen, da man zur Bestimmung des Rückstands den Plan- und den Ist-Abgang eines Arbeitssystems benötigt. Es bieten sich für den Umgang mit dem Rückstand prinzipiell zwei Vorgehensweisen an:

- Erfassung des Rückstands aus Anzeigen vor Ort (bspw. Monitore oder Planungsboards)
- Grobe Abschätzung der rückstandsbedingten Terminabweichung aus Termindaten des Umlaufbestands

Es ist durchaus üblich, dass sowohl der Plan-Abgang als auch der Ist-Abgang über Monitore in der Fertigung angezeigt werden, um schnell auf Fertigungsrückstände reagieren zu können. In diesem Fall, kann aus der Differenz beider Werte der Rückstand ermittelt werden. Aus dem Rückstand kann anschließend über die zweite Trichterformel die Terminabweichung bestimmt werden:

$$TAA_m \approx \frac{RSA(T_0)}{LA_m} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ BKT} \quad 3-5$$

- $TAA_m$  : mittlere Terminabweichung am System „Drehen“ [BKT]  
 $RSA(T_0)$  : Rückstand zum Aufnahmezeitpunkt in Anzahl Aufträgen [-]  
 $LA_m$  : mittlere Leistung des Systems „Drehen“ in Anzahl Aufträgen [1/BKT]

Dieses Vorgehen ist zu bevorzugen, da es den Rückstand als Regelgröße direkt erfasst und somit zu einem verbesserten Verständnis über die Termintreue beiträgt. Es erfordert jedoch die Angabe von Plan- und Ist-Abgang in der Fertigung. Dies ist oftmals nicht der Fall, sodass ein Ausweichverfahren notwendig ist. Dieses ist im Folgenden beschrieben.

Die mittlere Terminabweichung kann mit der zuvor bestimmten Ist-Durchlaufzeit und den Plan-Bearbeitungsenden der am Arbeitssystem befindlichen Aufträge abgeschätzt werden. Das Plan-Bearbeitungsende eines Vorgangs ist in der Regel in den Auftragsbegleitpapieren verzeichnet. Zunächst wird für jeden Auftrag am Arbeitssystem die Differenz aus Plan-Bearbeitungsende und aktuellem Datum bestimmt. Die Differenz ergibt die verbleibende Durchlaufzeit eines Auftrags:

$$ZDLV_i = TBE_i - T_0 \quad 3-6$$

- $ZDLV_i$  : verbleibende Durchlaufzeit von Auftrag  $i$  [BKT]  
 $TBE_i$  : Plan-Bearbeitungsende von Auftrag  $i$  [BKT]  
 $T_0$  : Tag der Datenaufnahme [BKT]

Anschließend wird der Mittelwert der verbleibenden Durchlaufzeiten der Aufträge gebildet:

$$ZDLV_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TBE_{plan, i} - T_0) \quad 3-7$$

- $ZDLV_m$  : mittlere verbleibende Durchlaufzeit [BKT]  
 $TBE_{plan, i}$  : Plan-Bearbeitungsende von Auftrag  $i$  [BKT]  
 $T_0$  : aktuelles Datum [BKT]

Die Einzelwerte der verbleibenden Durchlaufzeit werden als Histogramm dargestellt. Abb. 3-10 zeigt eine solche Verteilung für das Beispiel-Arbeitssystem „Drehen“. Besitzen die Aufträge eine negative verbleibende Durchlaufzeit, sind sie an diesem Arbeitssystem bereits verspätet. Im Beispiel sind acht von 13 Aufträgen bereits gegenüber dem Plan verspätet.

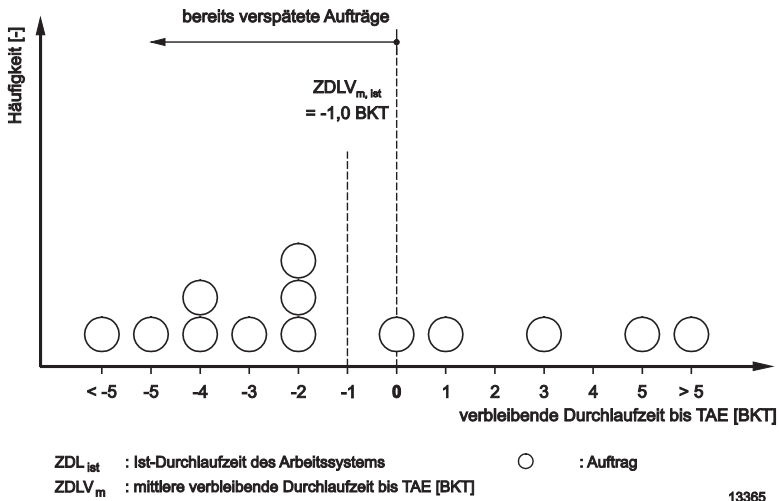


Abb. 3-10: Verteilung der verbleibenden Durchlaufzeiten

Zuvor wurde für das Arbeitssystem eine Durchlaufzeit von 2,6 BKT bestimmt. In einem Idealprozess ohne Terminabweichungen gehen die Aufträge einem System weder verfrüht zu, noch weisen sie eine Verspätung auf. Damit ist auch die Gestalt des Histogramms festgelegt: Die Durchlaufzeit spannt den Soll-Bereich der Verteilung der verbleibenden Durchlaufzeiten auf. Alle Aufträge sollten somit eine verbleibende Durchlaufzeit zwischen Null und der Durchlaufzeit des Arbeitssystems besitzen. Der Mittelwert der verbleibenden Durchlaufzeiten entspricht folglich der halben Ist-Durchlaufzeit. Abb. 3-11 zeigt das Vorgehen zur Bestimmung der Terminabweichung aus Rückstand für das Beispiel-Arbeitssystem.

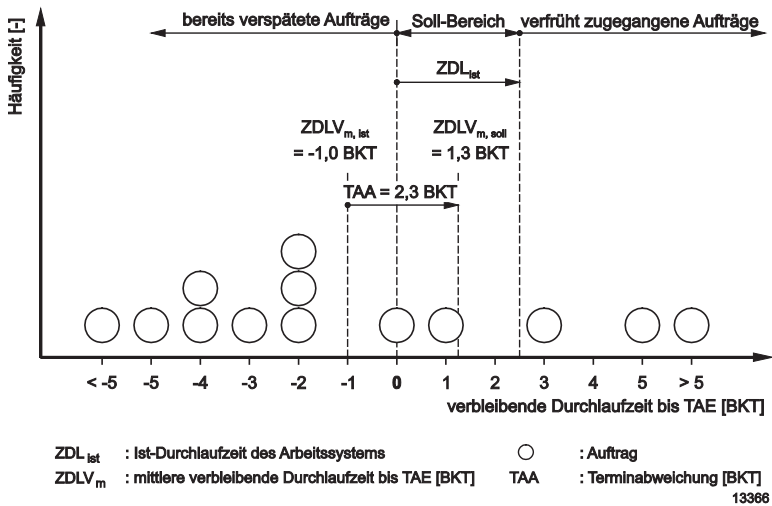


Abb. 3-11: Diagramm zur Schätzung der mittleren Terminabweichung am Beispiel-Arbeitssystem

Die Terminabweichung ergibt sich entsprechend aus der Differenz der halben Durchlaufzeit (Sollwert der mittleren verbleibenden Durchlaufzeit) und dem tatsächlichen Mittelwert der verbleibenden Durchlaufzeit:

$$TAA_{m, geschätzt} = \frac{ZDL_{Ist}}{2} - ZDLV_m \quad 3-7$$

$TAA_{m, geschätzt}$ : geschätzte mittlere Terminabweichung am Arbeitssystem [BKT]

$ZDL_{Ist}$  : Ist-Durchlaufzeit des Arbeitssystems [BKT]

$ZDLV_m$  : mittlere verbleibende Durchlaufzeit [BKT]

### Darstellung der Terminabweichung

Die mittlere Terminabweichung wird für jedes Arbeitssystem ermittelt und in der Wertstromkarte entsprechend für jedes Arbeitssystem dargestellt. Die Terminabweichung kann grundsätzlich positive und negative Werte annehmen. Dargestellt wird die Terminabweichung aus Rückstand durch eine symbolisierte Stoppuhr unter der Durchlaufzeitangabe an jedem Prozess (Abb. 3-12).

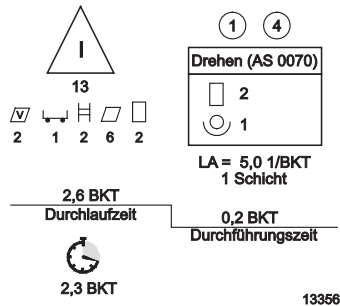


Abb. 3-12: Darstellung der Terminabweichung aus Rückstand

#### Schritt 4: Aufnahme der Planungs- und Steuerungsinformationen

Der Informationsfluss einer Fertigung besteht zu großen Teilen aus Planungs- und Steuerungsinformationen. Diese sollen in der Wertstromanalyse aufgenommen und dargestellt werden. Die Produktionsplanung und -steuerung kann in der Auftragsfertigung vereinfachend in vier Teilaufgaben unterteilt werden:

- Auftragsannahme und -terminierung
- Auftragsfreigabe
- Reihenfolgebildung
- Kapazitätssteuerung

Häufig sind diese Aufgaben in den Unternehmen nicht als solche systematisch identifiziert, in den allermeisten Unternehmen werden sie dennoch – wenn auch nicht bewusst – umgesetzt. Um an die Informationen zu gelangen, sind unterschiedliche Quellen zu befragen. Es ist notwendig, sich nicht auf die evtl. schriftlich fixierten Anweisungen zur Produktionsplanung und -steuerung zu verlassen, sondern die Informationen direkt bei den handelnden Mitarbeitern einzuholen.

**Auftragsannahme und -terminierung** Die Produktionsplanung erfolgt in der Regel über ein zentrales PPS- oder ERP-System und besitzt daher für die gesamte Fabrik bzw. den kompletten Fertigungsbereich Gültigkeit. Zur Informationsgewinnung sollten folgende Fragen gestellt werden:

- Wie wird die Lieferzeit ermittelt?
- Werden Kundenanfragen abgelehnt?
- Wie werden Plan-Starttermine für die Aufträge und die Plan-Bearbeitungstermine für die Vorgänge bestimmt?

Diese Informationen sollten vor dem eigentlichen Fertigungsrundgang gewonnen werden, da sie das Verständnis über die tatsächlichen Abläufe in der Fertigung erhöhen. Zur Informationsbeschaffung sollte die Abteilung kontaktiert werden, die für die Produktionsplanung zuständig ist.

**Auftragsfreigabe** Die Freigabe von Fertigungsaufträgen erfolgt häufig zum Plan-Starttermin. Die Auftragsfreigabe gilt daher ebenso wie die Auftragsannahme und -terminierung für den gesamten Fertigungsbereich und soll ebenso vor dem Rundgang in einem Interview erhoben werden. Angaben zur Auftragsfreigabe können in der Regel Personen treffen, die in die operative Fertigungssteuerung eingebunden sind (Arbeitsvorbereitung, Meister, Produktionsleitung). Es ist zu beachten, dass die vorgegebene Auftragsfreigabe in der Praxis häufig übersteuert wird, um bspw. Auslastungsverluste an einzelnen Stationen zu vermeiden.

**Reihenfolgebildung** Da die Plantermine eingehalten werden sollten, ist die Reihenfolgebildung häufig durch die vorangegangene Terminierung bereits festgelegt. Sehr häufig verschieben sich jedoch die Prioritäten, sodass Fertigungsmitarbeiter die Reihenfolge nach anderen Kriterien als dem Plantermin bilden. Bei der Auswahl des nächsten Auftrags ist z.B. in der betrieblichen Praxis oftmals entscheidend, Rüstaufwände zu vermeiden. Die Reihenfolgebildung kann vorzugsweise beim Maschinenbediener bzw. beim Produktionsmitarbeiter erfragt werden.

**Kapazitätssteuerung** Die Kapazitätssteuerung wird in vielen Unternehmen tagtäglich von Meistern und Fertigungsleitern durchgeführt, ohne dass dies bewusst unter dem Namen der Kapazitätssteuerung oder eines spezifischen Verfahrens fällt. Häufig erfolgt die Kapazitätssteuerung in Form einer Planorientierten Kapazitätssteuerung. Die Kapazitätssteuerung sollte für jedes System aufgenommen werden, da die Form der Kapazitätsanpassung für jedes Arbeitssystem individuell erfolgen kann. Als Informationsquelle sollen Unternehmensvertreter befragt werden, die für die Ansetzung von bspw. Überstunden verantwortlich sind.

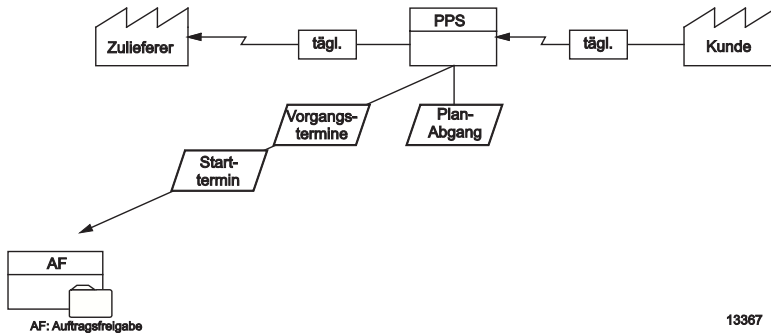
Tab. 3-2 fasst die Informationen mit Aufnahmeebene, Aufnahmezeitpunkt und Quelle zusammen. Zur Erhebung der Informationen zur Auftragsannahme und -terminierung und zur Auftragsfreigabe bietet sich ein *Experteninterview* mit dem zuständigen Produktionsplaner und der Produktionsleitung vor dem Rundgang an.

**Tab. 3-2:** Aufnahmeebene und Quellen für die Steuerungsinformationen

Information	Aufnahmeebene	Aufnahmezeitpunkt	Quelle
Auftragsannahme und -terminierung	Fabrik / Fertigungsbereich	vor dem Rundgang	Produktionsleitung / Produktionsplanung
Auftragsfreigabe	Fertigungsbereich	vor dem Rundgang	Produktionsleitung / Meister
Reihenfolgebildung	Arbeitssystem	während des Rundgangs	Werker / Meister
Kapazitätssteuerung	Arbeitssystem	während des Rundgangs	Produktionsleitung / Meister

### Darstellung der Planungs- und Steuerungsinformationen

Die Terminierung erfolgt in der Produktionsplanungsabteilung, die als Prozesskasten dargestellt wird (Abb. 3-13). Die Produktionsplanung nimmt Kundenanfragen an und wandelt diese in Fertigungs- und Beschaffungsaufträge um. Mit der Annahme der Aufträge erfolgt in der Regel auch automatisch deren Terminierung. Standardmäßig arbeiten ERP-Systeme mit einer Rückwärtsterminierung und legen somit ausgehend von den gewünschten Endterminen die Plan-Starttermin des Auftrags und die Plan-Endtermine der Vorgänge fest. Die Termininformationen gehen an die Auftragsfreigabe, die ebenfalls als Prozess dargestellt ist. Die Terminierung legt darüber hinaus den Plan-Abgang der Arbeitssysteme fest, der entsprechend an die Arbeitssysteme übermittelt werden sollte.



**Abb. 3-13:** Darstellung der Planungs- und Steuerungsinformationen

**Auftragsfreigabe** Die Auftragsfreigabe ist in der Abbildung in der linken Bildhälfte dargestellt und wird mit einem Ordner versehen, der mit dem jeweils vorgegebenen Verfahren zur Auftragsfreigabe beschriftet ist. In vielen Unternehmen ist dies – wie in diesem Beispiel – die Freigabe nach Termin (Abb. 3-14, links).

**Reihenfolgebildung** Dieses Beispiel enthält drei Verfahren zur Reihenfolgebildung, die in der Praxis besonders häufig auftreten (Abb. 3-14). Am ersten Arbeitssystem werden die

Aufträge in der Reihenfolge des Plan-Endtermins bearbeitet, was durch drei priorisierte Kärtchen symbolisiert wird. Am zweiten Arbeitssystem ist eine rüstopoptimale Reihenfolgebildung umgesetzt, symbolisiert durch einen gebogenen Pfeil. Das dritte Arbeitssystem hat eine FIFO-Reihenfolgebildung etabliert. Diese wird durch das bereits bekannte FIFO-Symbol dargestellt.

**Kapazitätssteuerung** Die Kapazitätssteuerung wird als Box unter dem Arbeitssystem gekennzeichnet. Das erste System besitzt keine Kapazitätssteuerung, diese gilt entsprechend als undefiniert. Die Brille am zweiten System symbolisiert die aus der konventionellen Wertstromanalyse bekannte „Go see“-Steuerung. Diese steht für den Fall einer unsystematisch organisierten Kapazitätssteuerung, der in der Praxis sehr häufig vorzufinden ist. Die Planorientierte Kapazitätssteuerung am dritten System ist ebenfalls häufig in der Praxis zu finden.

Abb. 3-14 fasst die Symbolik der Fertigungssteuerung zusammen.

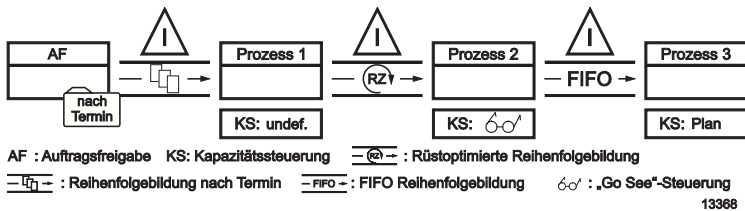


Abb. 3-14: Darstellung der Steuerungsinformationen

### 3.2.3 Datenintegration zur Wertstromkarte

Sind alle Informationen aufgenommen, findet als nächster Schritt die Datenintegration statt. Ziel der Datenintegration ist es, die aus verschiedenen Quellen stammenden Daten vollständig zu einer Einheit zusammenzufügen. Die Einheit steht in diesem Fall für die Wertstromkarte, die den Durchlauf eines Produkts darstellt. Die Wertstromkarte soll den Anwender dazu befähigen, die Plan-Vorgaben auf einen Blick hinterfragen zu können und Abweichungen von der Planung in der realen Fertigung zu erkennen. Die Erstellung ist ein schrittweiser Prozess und wird im Folgenden an einem fiktiven Beispiel vorgestellt.

#### Schritt 1: Auswahl einer Fertigungsfamilie

Im ersten Schritt wird zunächst eine Fertigungsfamilie ausgewählt. Dazu wird aus der Produkt-Arbeitssystem-Matrix (vgl. Abschn. 3.2.1) ein Produkt gewählt. Dies kann nach unternehmenseigenen Kriterien geschehen und bspw. ein Produkt sein, das über ein mög-

lichst große Anzahl der vorhandenen Arbeitssysteme läuft oder ein Produkt, das besonders häufig nachgefragt wird.

### **Schritt 2: Darstellung des Materialflusses**

Zunächst werden die vom Produkt durchlaufenen Prozesse bzw. Arbeitssysteme abgebildet. Der Materialfluss verläuft, analog zur konventionellen Methode (vgl. [Roth04]), von links nach rechts und ist losgelöst vom tatsächlichen Fabriklayout. Im Beispiel soll ein Produkt abgebildet werden, das vier Arbeitsvorgänge besitzt. Alle Arbeitssysteme werden als Prozessboxen mit ihren Arbeitssysteminformationen dargestellt. Zusätzlich werden der Kunde und der Zulieferer eingetragen und über breite Pfeile mit der Fertigung verbunden. Wird ein bestimmtes Arbeitssystem mehrfach durchlaufen, weil bspw. neben der Endkontrolle noch eine Zwischenkontrolle am selben System erfolgt, würde das Arbeitssystem zweimal im Materialfluss abgebildet.

### **Schritt 3: Ergänzung um logistische Zielgrößen**

Im dritten Schritt werden die logistischen Zielgrößen, die während des Rundgangs für jedes Arbeitssystem aufgenommen wurden, eingetragen. Dies sind der Bestand, die Durchlaufzeit und Durchführungszeit je Arbeitssystem, die rückstandsbedingte Terminabweichung je Arbeitssystem sowie für jedes Arbeitssystem der Plan-Rang der in Bearbeitung befindlichen Aufträge. Die Durchlauf- und Durchführungszeiten werden für das betrachtete Produkt jeweils addiert und ergeben somit die Gesamtzeiten für die abgebildete Fertigungsfamilie. Im Beispiel benötigt das betrachtete Produkt von der Freigabe bis zur Fertigstellung 16,6 BKT, es befindet sich jedoch nur 1,6 BKT in Bearbeitung. Die Reihenfolgedisziplin wird ebenfalls in die Darstellung eingetragen. Sie befindet sich am rechten Rand der Darstellung auf Höhe der symbolisierten Aufträge. Sie berechnet sich nicht nur aus den abgebildeten Aufträgen, sondern aus allen Aufträgen, die sich während der Datenaufnahme im gesamten Fertigungsbereich in Bearbeitung befanden.

### **Schritt 4: Ergänzung um Planungs- und Steuerungsinformationen**

Im letzten Schritt werden die Planungs- und Steuerungsinformationen hinzugefügt. Der PPS-Prozesskasten wird dabei zentral zwischen dem Zulieferer und dem Kunden angeordnet. Als weiterer Prozesskasten wird die Auftragsfreigabe in die Karte gezeichnet. Diese befindet sich links des ersten Arbeitssystems. Von der PPS gehen die Termine und der Plan-Abgang an die entsprechenden Prozesse. Im Beispiel (Abb. 3-15) erzeugt die PPS in der Termin- und Kapazitätsplanung zwar den Plan-Abgang jedes Systems, dieser wird jedoch nicht an die Arbeitssysteme kommuniziert. Daher fehlt an dieser Stelle die informatorische Verknüpfung mit den Arbeitssystemen.

Die Steuerungsaufgaben Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung werden anschließend mit ihrer bekannten Symbolik eingetragen.

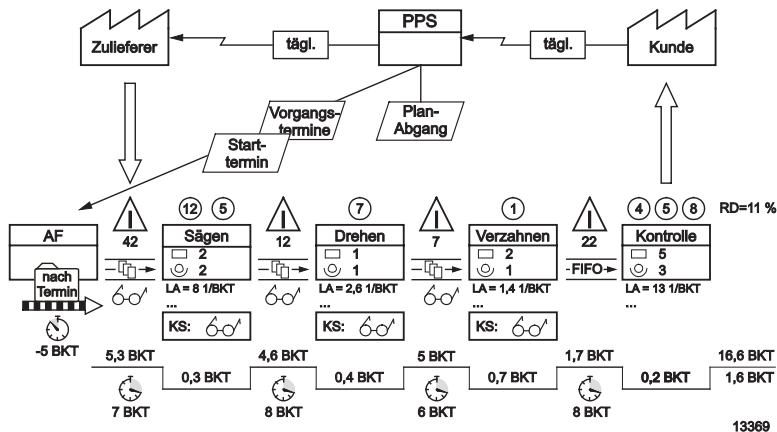


Abb. 3-15: Datenintegration zur Wertstromkarte

### 3.2.4 Identifikation von Handlungsfeldern

Aus der Wertstromkarte lassen sich auf einen Blick Handlungsfelder identifizieren, um die logistische Zielerreichung zu verbessern. Dafür ist es sinnvoll, die folgenden sechs Fragen zu stellen:

1. Werden die Aufträge termingerecht freigegeben?
2. Wird der Umlaufbestand der Fertigung geregelt?
3. Ist eine termingerechte Plan-Reihenfolge vorgegeben?
4. Ist die Umsetzung der Plan-Reihenfolge gewährleistet?
5. Wird der Plan-Abgang an die Arbeitssysteme kommuniziert?
6. Wird eine systematische Kapazitätssteuerung umgesetzt?

#### Fragen 1, 2: Termingerechte Auftragsfreigabe, Bestandsregelung

Mit der Annahme eines Auftrags findet in aller Regel eine Rückwärtsterminierung statt, die für alle Fertigungsaufträge einen Starttermin für die Fertigung bestimmt. Im Gespräch mit dem Produktionsleiter vor dem Rundgang ist zu erfragen, ob der vorgegebene Plan-Starttermin für die Auftragsfreigabe verfügbar ist. Ist dies nicht der Fall, sollte dieser Informationsfluss dringend etabliert werden. Auch wenn der Plan-Starttermin für die Auftragsfreigabe in vielen Fällen verfügbar ist, wird er nicht immer eingehalten. Werden Auf-



Kärtchen). Die manuelle Übersteuerung der Reihenfolgebildung wird mit dem Brillensymbol verdeutlicht (vgl. Abb. 3-17). Verdeutlicht wird die Reihenfolgevertauschung noch durch die Plan-Ränge der Aufträge in Bearbeitung. In diesem Beispiel bearbeitet das Arbeitssystem statt der Plan-Ränge 1, 2 und 3 die Plan-Ränge 4, 5 und 8. Für die gesamte Fertigung gibt zudem die Reihenfolgedisziplin (RD) als Kennzahl Aufschluss über das Verhalten bei der Reihenfolgebildung.

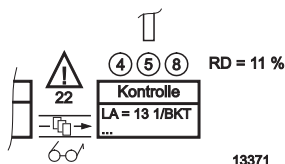


Abb. 3-17: Reihenfolgebildung an einem Arbeitssystem

### Fragen 5, 6: Plan-Abgang und Kapazitätssteuerung

Mit der Terminierung legt Produktionsplanung und -steuerung die Plan-Abgänge der Arbeitssysteme fest. Somit ist bestimmt, wieviel Arbeit ein Arbeitssystem jeden Tag erbringen muss. Die Kapazitätssteuerung ist bestrebt, die geforderte Kapazität täglich bereitzustellen, um die geplanten Termine in der Fertigung umzusetzen.

Der Plan-Abgang der Arbeitssysteme wird zwar in aller Regel bestimmt, jedoch häufig nicht an die Arbeitssysteme kommuniziert und dort visualisiert. Dies ist notwendig, um den Produktionsmitarbeitern eine Orientierung zu geben, wieviel Arbeitsvolumen für eine rückstandsfreie Fertigung abzarbeiten ist. In der Wertstromkarte wird dies durch eine fehlende Verbindung zwischen dem Plan-Abgang und den Arbeitssystemen symbolisiert. Schon gelegentliche, kleinere Störungen führen häufig zu einem Rückstand der Fertigung. Dem Rückstand wird im Beispiel zudem nicht mit einer systematischen Kapazitätssteuerung begegnet, sodass dieser sich aufsummiert und in der abgebildeten Terminabweichung je Arbeitssystem resultiert. Die Kapazitätssteuerung ist in der Wertstromkarte mit der „Go See“-Steuerung gekennzeichnet (vgl. Abb. 3-18).

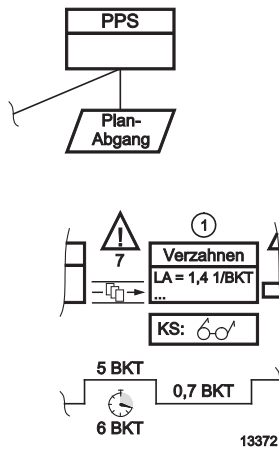


Abb. 3-18: Fehlende Kommunikation und unzureichende Kapazitätssteuerung

### 3.3 Ansätze zur Aufwandsreduzierung

Aus den Anforderungen an die Wertstromanalyse lässt sich ableiten, dass das Verfahren aufwandsarm sein sollte. Gegenüber der klassischen Wertstromanalyse sind jedoch einerseits zusätzliche Daten in der Fertigung zu erfassen und auszuwerten, um die Terminalsituation zu berücksichtigen. Andererseits sieht die Datenaufnahme vor, alle Arbeitssysteme eines Bereichs aufzunehmen, um anschließend alle Fertigungsfamilien abbilden zu können. Dieser Abschnitt stellt daher zwei Ansätze vor, um den Aufwand für die Datenerfassung und Datenintegration zu verringern.

#### 3.3.1 Softwareeinsatz zur Datenerfassung

Weil der gesamte Wertstrom mit allen Daten während des Rundgangs aufgenommen wird und sich der Anwender auf die Wertstromaufnahme konzentrieren soll, ist die klassische Wertstrommethode eine *Paper & Pencil*-Methode. Dieser Grundidee soll auch die Wertstrommethode für Auftragsfertiger folgen. Im Rundgang ist eine Softwareunterstützung jedoch hilfreich, weil sich die Bestände häufig nicht ausschließlich direkt an den Arbeitssystemen befinden und sich der Rundgang selbst auf die Datenaufnahme beschränkt. Die Wertstromkarte kann jedoch im Nachgang an den Fertigungsrundgang per *Paper & Pencil*-Verfahren erstellt werden. Für die Datenaufnahme im Rundgang wurde eine prototypische Applikation entwickelt.

### Anforderungen an die Software zur Datenerfassung

Die Anforderungen an den Software-Prototypen legen fest, welche Merkmale für das System als relevant betrachtet werden und in welcher Ausprägung die Merkmale erreicht werden sollen [Balz09, S. 464]. Sie lassen sich nach ISO/IEC 25010 wie folgt strukturieren:

- *Funktionalität*: Die Software soll den Anwender dabei unterstützen, die logistischen Regel- und Zielgrößen sowie Informationen zur Fertigungssteuerung aufzunehmen.
- *Effizienz*: Die Software soll zu einer Zeitersparnis des Anwenders im Vergleich zu einer händischen Aufnahme führen. Sie soll zudem so gestaltet sein, dass sie auf gängiger Hardware funktioniert, um teure Anschaffungen zu vermeiden.
- *Kompatibilität*: Nur in den seltensten Fällen wird eine Einzelperson die Datenaufnahme durchführen, da die Wertstrommethode klassischerweise eine Teamaufgabe ist. Die Software soll daher parallel auf mehreren mobilen Endgeräten funktionieren, damit die Anwender die Datenaufnahme untereinander aufteilen können. Für die Auswertung und Archivierung der Daten soll die Software eine Schnittstelle zu Computern mit unterschiedlichen Plattformen bereitstellen.
- *Benutzbarkeit*: Die Software soll den Anwender intuitiv dazu befähigen, diese zu verstehen und zu benutzen. Daher soll sie zum einen verständlich und attraktiv gestaltet sein. Zum anderen soll sie auch auf einem mobilen Endgerät anwendbar sein, da die Software auf einem Fertigungsrundgang eingesetzt werden soll.
- *Zuverlässigkeit*: Das System soll sein festgelegtes Leistungsniveau unter allen definierten Einsatzbedingungen behalten. Insbesondere ist zu vermeiden, dass Datenverluste entstehen, die bspw. durch Systemabstürze verursacht werden.
- *Sicherheit*: Die Beobachtung und Aufnahme von Produktionsprozessen ist ein sensibles Thema, sobald Mitarbeiter involviert sind. Die Software soll daher so gestaltet sein, dass die Daten vertraulich behandelt und ggf. anonymisiert werden können.
- *Wartbarkeit*: Die Wartbarkeit beschreibt die Eigenschaft der Software, Korrekturen, Verbesserungen oder Anpassungen zuzulassen. Im Prototypenstatus sind häufig noch Änderungen erforderlich, was in der Gestaltung der Software berücksichtigt werden soll.
- *Portabilität*: Die Portabilität beschreibt die Eigenschaft der Software, von einer Umgebung in eine andere übertragbar zu sein. Die Wertstromanalyse soll nicht nur in allen Produktionsbereichen eines Unternehmens funktionieren, sondern auch branchenübergreifend gültig sein. Die Software soll daher mit geringem Aufwand an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden können.

### Applikation für die Datenaufnahme auf einem mobilen Endgerät

Der Anwender der Wertstrommethode wird mit der entwickelten Software in die Lage versetzt, auf einem Fertigungsrundgang Wertstromdaten aufzunehmen. Die Aufnahme erfolgt auf drei Ebenen. Die Integration mehrerer Ebenen führt den Nutzer durch die Software und erleichtert die Handhabung der Software.

Auf der ersten Ebene legt der Anwender zunächst fest, welchen Fertigungsbereich er untersuchen möchte. Mit einer Berührung des Plus-Zeichens auf der ersten Ebene lässt sich ein neuer Bereich mit seiner Bezeichnung hinzufügen. Ein Klick auf den Namen des Bereichs führt in die nächste Ebene, die ähnlich strukturiert ist. In dieser können nun die im Bereich vorhandenen Arbeitssysteme ergänzt werden. Für jedes Arbeitssystem wird der Name des Systems, die mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen pro Betriebskalendertag und Informationen zur Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung eingetragen. Der Anwender kann die Arbeitssysteme in vielen Fällen schon vor dem Rundgang anlegen. Nach der Auswahl eines Arbeitssystems können an diesem Aufträge hinzugefügt werden. Dafür erfasst der Anwender für jeden Auftrag den Plan-Fertigstellungstermin und optional die Auftragsnummer. Soll der Bestand in Vorgabestunden erfasst werden, ist zusätzlich die Auftragszeit zu erfassen. Das Eintragsdatum wird automatisch erstellt, kann jedoch vom Benutzer korrigiert werden. Wenn sich ein Auftrag in Bearbeitung befindet, wird dies zusätzlich per Klick eingetragen. Abb. 3-19 zeigt die Benutzeroberfläche zur Erfassung von Auftragsdaten an einem Arbeitssystem.

← zurück

**Mechanische Fertigung > Drehen > neuer Auftrag**

Auftragsnummer  
FA1001

Auftragszeit in Stunden

Plan-Fertigstellungstermin

Datum des Eintrags  
31.10.2016

Auftrag in Bearbeitung

13374

Abb. 3-19: Benutzeroberfläche der Tablet-Applikation zur Erfassung von Auftragsdaten

Die Software bietet über die Datenaufnahme hinaus auch Auswertefunktionen auf Fertigungs- und Arbeitssystemebene. Für die Arbeitssysteme wird aus dem Bestand die mittlere Durchlaufzeit berechnet und aus der verbleibenden Durchlaufzeit der Aufträge die

mittlere Terminabweichung aus Rückstand geschätzt. Für den Fertigungsbereich wird die Reihenfolgedisziplin berechnet und in einem Diagramm dargestellt.

Nach dem Fertigungsrundgang kann der Nutzer die Daten als CSV-Datei exportieren. Die CSV-Datei erlaubt den Import in ein Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel. Auf diese Weise können Wertstromprojekte gespeichert werden, z.B. um verschiedener Fertigungsbereiche zu vergleichen.

### **3.3.2 Standardbogen zur Erstellung der Wertstromkarte**

Die Wertstromkarte wird für eine ausgewählte Fertigungsfamilie erstellt. Um mehrere Fertigungsfamilien abbilden zu können, sollte der Erstellungsaufwand möglichst gering sein. Dafür sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Der Anwender soll bei der Erstellung systematisch geführt werden und dennoch individuelle Ergänzungen vornehmen können.
- Der Anwender soll ohne großen Aufwand zwischen den Wertstromkarten verschiedener Produkte wechseln können.
- Die Wertstromkarte soll in analoger Form erstellt werden, um sie bspw. in der Fertigung oder in Seminarräumen auf Moderationswänden aufzuhängen.

Für die Datenintegration wird ein Standardbogen im DIN A5-Format entworfen, der jeweils ein Arbeitssystem mit allen Informationen abbildet. Der Bogen beinhaltet das Arbeitssystem als Prozesskasten, in den die Arbeitssystemkennzahlen eingetragen werden können. Zusätzlich können die logistischen Zielgrößen und die Informationen zur Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung ergänzt werden. Auch die Aufträge in Bearbeitung mit ihren Plan-Rängen können im Bogen markiert werden. Abb. 3-20 zeigt im linken Bildteil (a) einen Blankobogen und in der rechten Bildhälfte (b) einen ausgefüllten Bogen für ein Beispiel-Arbeitssystem.

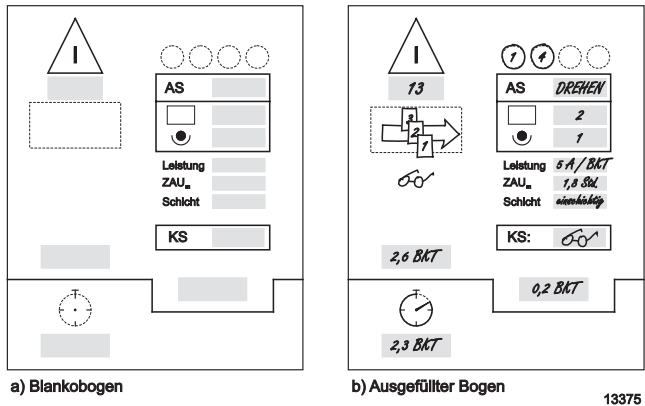


Abb. 3-20: Standardbogen für eine vereinfachte Datenintegration

Die Bögen sind so gestaltet, dass sie in beliebiger Reihenfolge hintereinandergeschaltet werden können. Da jeder Bogen ein Arbeitssystem repräsentiert, können so verschiedene Produkte mit ihren Fertigungsdurchläufen abgebildet werden. Die Bögen werden bspw. mit Magneten an einem Whiteboard befestigt, sodass die restlichen Informationen (PPS, Kunde etc.) anschließend mit einem Stift ergänzt werden können.



## 4 Konfiguration des Wertstromdesigns

In diesem Kapitel soll ein standardisiertes Wertstromdesign entwickelt werden, das in der Lage ist, die Fertigung eines Auftragsfertigers so zu steuern, dass die logistischen Ziele erreicht werden. Dafür werden zunächst die Anforderungen diskutiert und anschließend passende Methoden ausgewählt.

### 4.1 Anforderungen an das Wertstromdesign

Die Auftragsfertigung weist einige Besonderheiten gegenüber einer Lagerfertigung auf, die im Wertstromdesign berücksichtigt werden müssen. Es bestehen folgende Herausforderungen, die sich aus den Merkmalen der Auftragsfertigung (Abschn. 2.1) ergeben:

1. Die Einhaltung des versprochenen Termins besitzt für den Großteil der produzierenden Unternehmen die höchste Priorität (vgl. [FIR13]).
2. Auftragsfertiger stellen kundenindividuelle Produkte her und weisen somit eine hohe Produktvarianz auf.
3. Die hohe Produktvarianz erfordert häufig eine Fertigungsorganisation im Werkstattprinzip.
4. Auch in späten Phasen des Auftragsabwicklungsprozesses ist noch mit Kundenänderungseinflüssen zu rechnen.
5. Auftragsfertiger sind in vielen Fällen KMU, die keine Stabsstellen für Prozessverbesserungen / Lean-Aktivitäten besitzen.

Aus den Besonderheiten einer Auftragsfertigung ergeben sich konkrete Anforderungen an das Wertstromdesign eines Auftragsfertigers.

Die Punkte 1 und 2 führen zu folgenden Anforderungen:

- a) Um eine hohe Termintreue sicherzustellen, ist es notwendig, in der Fertigung Rückständen und Reihenfolgeabweichungen entgegenzusteuern (vgl. Abschn. 2.2.3).
- b) Eine hohe Reihenfolgedisziplin in der Fertigung sollte durch eine hohe Reihenfolgedisziplin im Zugang unterstützt werden. Das Wertstromdesign soll daher Reihenfolgeabweichungen im Zugang vermeiden.
- c) Kundenindividuelle Produkte führen häufig zu Prozessunsicherheiten in der Fertigung, die eine hohe Planungsgenauigkeit erschweren. Die Fertigungssteuerung sollte daher robust gegenüber diesen Störfaktoren sein und diese ausgleichen können.

Aus den Punkten 3) und 4) lassen sich folgende Merkmale ableiten:

- d) Eine Rückwärtsterminierung ist bei Auftragsfertigern sinnvoll, um den Fertigwarenbestand niedrig zu halten und um den spätesten Starttermin eines Auftrags zu erhalten.
- e) In der Werkstattfertigung lohnt sich häufig der Aufwand einer Feinplanung nicht und Aufträge werden gegen unbegrenzte Kapazitäten terminiert. Dies erschwert die gleichmäßige Auslastung der Arbeitssysteme, was das Wertstromdesign ausgleichen sollte.

Aus dem fünften Punkt ergibt sich die folgende Anforderung an eine Fertigungssteuerung:

- f) Damit das Wertstromdesign umgesetzt wird, muss es verständlich sein. Dies erhöht die Akzeptanz des Verfahrens, macht es ist weniger anfällig für Bedienfehler und vereinfacht die Gestaltung von Hilfsmitteln.

Aus den sechs genannten Anforderungen lassen sich konkrete Gestaltungsmerkmale für die Fertigungssteuerung ableiten. Die Gestaltung der Fertigungssteuerung erfolgt aufbauend auf diesen Anforderungen im nächsten Abschnitt.

### 4.2 Vorgehen bei der Konfiguration

Die Konfiguration des Wertstromdesigns orientiert sich in diesem Abschnitt am Modell der Fertigungssteuerung (vgl. 2.3.2), das die logistischen Zielgrößen mit den Aufgaben der Fertigungssteuerung verknüpft. Das Modell kennt die vier logistischen Zielgrößen [Lödd16, S. 8]:

- Termintreue
- Durchlaufzeit
- Bestand
- Auslastung

Den Zielen stehen vier Aufgaben der Fertigungssteuerung gegenüber, mit denen sich die Zielgrößen beeinflussen lassen. Die Struktur des folgenden Abschnitts folgt diesem Vorgehen.

1. Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Auftragsannahme und -terminierung
2. Auswahl eines passenden Auftragsfreigabeverfahrens

3. Auswahl von Reihenfolgeregeln für die Arbeitssysteme der Fertigung
4. Auswahl eines Verfahrens zur Kapazitätssteuerung

### **4.2.1 Auftragsannahme und -terminierung**

Die Auftragsannahme und -terminierung verbindet die Produktionsplanung mit der Fertigungssteuerung und besitzt damit eine große Bedeutung für die logistische Leistungsfähigkeit eines Unternehmens. Ziel der Auftragsannahme und -terminierung ist es, Belastung und Kapazität der Fertigung aufeinander abzustimmen, realistische Fertigstellungstermine der Aufträge vorzugeben und die Kapitalbindung durch zu früh fertiggestellte Aufträge zu begrenzen.

Die Auftragsannahme und -terminierung ist in der Regel an PPS-Systeme gekoppelt, von denen in der industriellen Praxis eine Vielzahl existiert und die nach unterschiedlichen Prinzipien agieren. Es ist daher schwierig, eine Standard-Konfiguration für die Auftragsannahme und -terminierung vorzugeben. Vielmehr sollen in diesem Abschnitt Standardmerkmale formuliert werden, die es Unternehmen ermöglichen, die eigene Auftragsannahme und -terminierung zu überprüfen und konkrete Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Aus den Anforderungen (vgl. Abschn. 4.1) ergeben sich konkrete Gestaltungsmerkmale.

#### **Terminierungslogik**

Der Aufwand einer Feinterminierung ist für Auftragsfertiger mit Werkstätten häufig wenig sinnvoll, weil dieses Verfahren sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Vorgabezeiten und Kapazitätsangaben stellt. Bei ausreichender Kapazität der Fertigung ist es meist ausreichend, eine Durchlaufterminierung mit anschließender Kapazitätsplanung vorzunehmen.

#### **Terminierungsrichtung**

Die Durchlaufterminierung soll im Fall einer Auftragsfertigung die frühzeitige Fertigstellung von Aufträgen verhindern, da dies den Fertigwarenbestand unnötig erhöht. Es ist deshalb eine Rückwärtsterminierung zu bevorzugen, die ausgehend von einem Kundenwunschtermin und einem definierten Lieferzeitpuffer einen Plan-Starttermin festlegt.

#### **Detaillierungsgrad der Terminierung**

In der betrieblichen Praxis finden unterschiedliche Terminierungsverfahren Anwendung, die sich durch ihren Detaillierungsgrad unterscheiden (vgl. [Wien10, S. 318]). Es können bspw. mittlere Auftragsdurchlaufzeiten abgeschätzt oder jeder Arbeitsvorgang mit ar-

beitsplatzbezogenen Plan-Durchlaufzeiten eingeplant werden. Das letztere Verfahren ist zu bevorzugen, da es eine höhere Genauigkeit gewährleistet und durch PPS-Systeme unterstützt wird. Für jeden Arbeitsgang wird ausgehend von einem Kundenwuschtermin der Fertigstellungstermin bestimmt.

### **Kapazitätsabgleich**

Im Anschluss an die Durchlaufterminierung findet der Kapazitätsabgleich statt. Für jedes Arbeitssystem wird ein Belastungsprofil erstellt, indem die Arbeitsgänge mit ihren Vorgabestunden auf ein Kapazitätskonto gebucht werden. Es schließt sich eine Kapazitätsanpassung und ggf. ein Belastungsabgleich an, in welchem einzelne Arbeitsvorgänge zeitlich verschoben werden, um das Belastungsprofil dem Kapazitätsprofil des Arbeitssystems anzupassen [Schu14, S. 174ff.].

### **4.2.2 Auftragsfreigabe**

Die Auftragsfreigabe gibt den tatsächlichen Zugang von Aufträgen in die Fertigung vor. Sie bestimmt den Bearbeitungsbeginn eines Auftrags und ist damit maßgebend für das Bestandsniveau der Fertigung. Grundsätzlich kann zwischen drei Kriterien unterschieden werden [Lödd16, S. 340ff.]:

- Auftragsfreigabe nach Termin
- Bestandsregelnde Auftragsfreigabe
- Sofortige Auftragsfreigabe

Die sofortige Auftragsfreigabe führt, insbesondere in der Auftragsfertigung, zu unnötig hohen Beständen, da alle Aufträge unabhängig von ihrer Dringlichkeit freigegeben werden und um Kapazitäten konkurrieren. Der Umlaufbestand der Fertigung ist damit insgesamt sehr hoch und stark streuend, was wiederum zu langen und unvorhersehbaren Durchlaufzeiten führt [Lödd16, S. 298]. In der Auftragsfertigung ist diese Form der Auftragsfreigabe daher nicht verbreitet und soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden.

### **Auftragsfreigabe nach Termin**

Die Auftragsfreigabe nach Termin setzt eine Terminierung von Produktionsaufträgen voraus, in welcher die notwendigen Starttermine der Aufträge ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Auftragsfreigabe steuert dann Aufträge in die Fertigung ein, sobald der geplante Starttermin erreicht wird. Das Verfahren hat den Nachteil, dass der Bestand in der Fertigung nicht geregelt werden kann. In eine Fertigung, die sich im Rückstand befin-

det, werden auch weiterhin neue Aufträge eingesteuert. Im umgekehrten Fall eines negativen Rückstands, wenn die Fertigung den geplanten Abgang übertrifft, gibt dieses Verfahren keine Aufträge in die Fertigung frei. Eine Auftragsfreigabe nach Termin erzielt folglich immer dann gute Ergebnisse, wenn in der Auftragsannahme und -terminierung der Rückstand der Fertigung berücksichtigt wird. Dies dürfte bei den meisten Auftragsfertigern nicht durchgehend und in systematischer Weise der Fall sein. Vorteil dieser Methode ist, dass sie keine Reihenfolgevertauschung im Zugang verursacht und somit zu einer hohen Termintreue beiträgt.

### **Bestandsregelnde Freigabe**

Die bestandsregelnden Verfahren sollten Reihenfolgeabweichungen im Auftragszugang vermeiden und so einfach sein, dass sie leicht verständlich sind. Verfahren mit einem arbeitssystemspezifischen Belastungsabgleich kommen daher aufgrund ihrer Komplexität nicht in Frage. Zwar sind diese Verfahren für Fertigungsbereiche mit einer hohen Materialflusskomplexität gut geeignet, da Aufträge, die nur auf wenig belasteten Arbeitssystemen bearbeitet werden, frühzeitig freigegeben werden. Dies führt jedoch zu Reihenfolgevertauschungen im Zugang zur Fertigung. Zudem ist ein arbeitssystemspezifischer Belastungsabgleich in der betrieblichen Anwendung aufwändig und benötigt in der Regel Softwareunterstützung. Für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe bieten sich daher die Conwip- und die Engpasssteuerung an – beides kartenbasierte Verfahren.

**Conwip-Steuerung** Die Conwip-Steuerung ist eine besonders einfache Umsetzung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe. Für eine Fertigung wird eine Bestandsgrenze in Anzahl Aufträgen festgelegt, die nicht über- oder unterschritten werden soll. Die Umsetzung erfolgt über die Conwip-Karten, die den Aufträgen zugeordnet werden. Eine Conwip-Karte begleitet einen Auftrag während des gesamten Fertigungsdurchlaufs. Mit der Fertigstellung des Auftrags wird die Conwip-Karte frei und kann einem neuen Auftrag zugeordnet werden. Das Verfahren setzt voraus, dass eine Liste mit wartenden und bereits terminierten Aufträgen existiert. In ihrer ursprünglichen Form wurde die Methode für eine Fertigungslinie mit Standardaufträgen entwickelt [Hopp08, S. 363ff.]. Prinzipiell ist das Verfahren aber auch für eine Werkstattfertigung mit streuenden Auftragsgrößen anwendbar. Für diesen Fall kann alternativ ein Soll-Bestand in Vorgabestunden angegeben werden, um Bestandsschwankungen zu reduzieren. In der Praxis hat sich, häufig auch in komplexeren Produktionssystemen, das Grundverfahren bewährt (vgl. [Koch15, S. 36ff.]).

**Engpass-Steuerung** Die Engpass-Steuerung ist verwandt mit der Conwip-Steuerung, die Fertigung wird hierbei jedoch in zwei Bereiche aufgeteilt: in einen bestandsgeregelten Teil bis einschließlich zum Engpass und in einen nicht bestandsgeregelten Bereich nach dem Engpass. Der Engpass ist das Arbeitssystem, dessen mittlere Auslastung deutlich hö-

her als die der übrigen Arbeitssysteme ist [Lödd08, S. 344]. In der Engpass-Steuerung begleitet die Karte den Auftrag bis zum Engpass-System, wird mit Fertigstellung des Auftrags am Engpass frei und kann anschließend einem neuen Auftrag zugeordnet werden. Die Engpass-Steuerung sorgt für eine hohe Auslastung des Engpasses, sodass bei gleichem Bestandsniveau die Engpass-Steuerung eine höhere Leistung als die Conwip-Steuerung besitzt (vgl. [Wein88, S. 122]). Dieser Vorteil gilt nur so lange, wie auch ein eindeutiger Engpass vorhanden ist. In der Werkstattfertigung ist dies klassischerweise jedoch nicht der Fall, da das Engpasssystem je nach Auftragsmix wechselt.

### Fazit

Für die Auftragsfreigabe existiert eine Vielzahl an Methoden mit spezifischen Vor- und Nachteilen. Ein Wertstromdesign im Allgemeinen und eine Auftragsfertigung im Besonderen besitzen Charakteristika, die zahlreiche Verfahren im Vorfeld ausschließen (bspw. Bestandsregelung mit arbeitssystemspezifischen Belastungsabgleich). Es eignen sich in einem Wertstromdesign für Auftragsfertiger insbesondere zwei Verfahren: die Conwip-Steuerung als einfachste bestandsregelnde Auftragsfreigabe sowie die Auftragsfreigabe nach Termin. Beide Verfahren sollen in einer Simulation für ihren Einsatz im Wertstromdesign evaluiert werden.

### 4.2.3 Reihenfolgebildung

Als nächste Aufgabe der Fertigungssteuerung soll die Reihenfolgebildung an den Arbeitssystemen konfiguriert werden. Die Reihenfolgeregel bestimmt, welcher Auftrag nach der Fertigstellung des auf der Maschine befindlichen Auftrags aus der Warteschlange gewählt wird. Da für produzierende Unternehmen und insbesondere für Auftragsfertiger die Liefertreue die bestimmende logistische Zielgröße ist [FIR13, S. 3], soll die Reihenfolgebildung eine hohe interne Termintreue unterstützen. Hierzu kommen nach Lödding folgende Reihenfolgeregeln in Frage [Lödd16, S. 445]:

- First-in-First-out (FIFO)
- Frühester Plan-Endtermin (FPE)
- Frühester Plan-Starttermin (FPS)
- Geringster Restschlupf (Schlupfzeitregel)

**FIFO** Die FIFO-Regelung, wie sie auch im klassischen Wertstromdesign vorgeschlagen wird, arbeitet die Aufträge in der Reihenfolge ihres Zugangs ab und wird daher auch als natürliche Reihenfolgebildung bezeichnet [Conw67, S. 152]. Dies führt dazu, dass Aufträge bei konstantem Bestand auch eine konstante Verweildauer in der Warteschlange besitzen. Konstante Durchlaufzeiten unterstützen eine hohe Liefertreue zum Kunden. Zudem lässt sich diese Regel leicht über passende Hilfsmittel wie bspw. Durch-

lauffreigale unterstützen bzw. erzwingen. Nachteil dieser Methode ist, dass sie einmal verspätete Aufträge nicht mehr beschleunigt [Lödd16, S. 445].

**FPE** Die FPE-Regel sortiert die Aufträge in der Warteschlange eines Arbeitssystems entsprechend ihrer geplanten Endtermine am Arbeitssystem. Ziel dieses Verfahrens ist es, die in der Produktionsplanung festgelegten Arbeitsvorgangstermine genau umzusetzen. Somit beschleunigt das Verfahren Aufträge, die verspätet freigegeben wurden oder aufgrund von Maschinenausfällen verspätet am System eintreffen. Komplexe Materialflüsse erleichtern Reihenfolgevertauschungen, sodass die FPE-Regel hier aktiv zu einer hohen Termintreue beiträgt. Hilfsmittel für eine Reihenfolgebildung nach Termin existieren, sind jedoch in der Umsetzung auf eine höhere Mitarbeiterpartizipation angewiesen als die Durchlaufregale der FIFO-Regelung [Lödd16, S. 446].

**FPS** Die FPS-Regel ist mit der FPE-Regel verwandt; anstatt nach geplantem Endtermin sortiert diese Regel die Aufträge nach ihrem geplanten Starttermin. Beide Regelungen sind in einer Feinterminierung identisch. Bei einer Terminierung in die unbegrenzte Kapazität hat die FPS-Regel den Vorteil, dass bei Aufträgen mit identischem Plan-Endtermin der Auftrag mit der größeren Auftragszeit bevorzugt wird. Insgesamt führt die FPS-Regel zu einer leicht besseren Termintreue als die FPE-Regel [Lödd16, S. 446]. Entscheidender Nachteil der Methode ist, dass der früheste Plan-Starttermin eines Auftrags in der Fertigung nicht einfach zu identifizieren ist, da auf den Auftragsbegleitkarten in der Regel die Plan-Endtermine vermerkt sind.

**Schlupfzeitregel** Die Schlupfzeitregel sortiert die Aufträge nach ihrem Restschlupf. Der Restschlupf eines Auftrags bezeichnet die Differenz zwischen der verbleibenden Zeit bis zur geplanten Fertigstellung und den noch ausstehenden Bearbeitungs- und Mindestübergangszeiten. Der Schlupf gibt an, wie groß die Gefahr einer Verspätung für einen Auftrag ist. Ein negativer Schlupf bedeutet bei einem losweisen Transport des Auftrags, dass der Auftrag verspätet fertiggestellt werden wird. Die Reihenfolgeregel hat jedoch zwei entscheidende Nachteile: Aufträge haben kurz nach ihrer Freigabe noch einen relativ großen Schlupf und werden dementsprechend auch gegenüber im Plan nicht verzögerten Aufträgen nachrangig behandelt, um im späteren Verlauf bei sinkendem Schlupf wieder beschleunigt zu werden. Zudem muss der Schlupf von Aufträgen mit jedem eintreffenden Auftrag neu berechnet werden [Lödd16, S. 447].

### Fazit

Für einen praktikablen Einsatz in der Fertigung sind insbesondere die FIFO- und die FPE-Regel geeignet. Beide Verfahren überzeugen durch eine einfache Umsetzung und besitzen einen positiven Einfluss auf die Termintreue. Es ist somit zu überprüfen, welches der beiden Verfahren in der Simulation einer Auftragsfertigung zu besseren Ergebnissen führt.

#### 4.2.4 Kapazitätssteuerung

Die Kapazitätssteuerung soll eine Fertigung dabei unterstützen, die Planungsvorgaben zu erfüllen. Die Kapazitätssteuerung bestimmt kurzfristig über den Einsatz von Kapazitäten und verursacht deshalb unmittelbar Kosten für ein Unternehmen [Lödd16, S. 532]. Verfahren der Kapazitätssteuerung sollten daher, neben ihrem Einfluss auf die Termintreue, immer auch unter wirtschaftlichen Aspekten ausgewählt werden.

Zu den Verfahren der Kapazitätssteuerung, die die Erfüllung von Planungsvorgaben unterstützen, zählen:

- Planorientierte Kapazitätssteuerung
- Rückstandsregelung
- Terminorientierte Kapazitätssteuerung

**Planorientierte Kapazitätssteuerung** Diese Form der Kapazitätssteuerung sorgt dafür, dass die Ist-Kapazität erhöht wird, wenn diese hinter die geplante Kapazität zurückfällt. Der umgekehrte Fall einer Kapazitätsreduzierung ist in der Praxis kaum verbreitet [Lödd16, S. 533]. Ein einfaches Beispiel für ein solches Verfahren ist der Einsatz von Springern bei einem Mitarbeiterausfall. Das Verfahren hat den Vorteil, dass es reagiert, bevor Rückstände entstehen. Das Verfahren kann jedoch nicht alle Gründe für die Entstehung von Rückständen berücksichtigen und somit Terminabweichungen von Aufträgen nicht immer verhindern.

**Rückstandsregelung** Ziel der Rückstandsregelung ist es, die Mengen- und Terminvorgaben der Produktionsplanung auch bei Störungen in der Fertigung umzusetzen [Lödd16, S. 533]. Die Rückstandsregelung vergleicht den in der Terminierung festgelegten Planabgang mit dem tatsächlichen Abgang eines Systems und ermittelt daraus den Rückstand. Liegt ein positiver Rückstand vor, erhöht die Rückstandsregelung die Systemkapazität, um den Rückstand schnellstmöglich abzubauen [Brei01, S. 74]. Das Verfahren ist theoretisch in der Lage, eine der Hauptursachen für Terminabweichungen vollständig zu beseitigen und trägt daher aktiv zu einer hohen Termintreue bei.

**Terminorientierte Kapazitätssteuerung** Die terminorientierte Kapazitätssteuerung berechnet in einem ersten Schritt die voraussichtliche Abgangsterminabweichung von Aufträgen an einem Arbeitssystem. Zur Berechnung schätzt das Verfahren die voraussichtliche Auftragsdurchlaufzeit bei der aktuellen Bestandssituation des Arbeitssystems ab. Weist mindestens ein Auftrag eine positive Terminabweichung auf, so erhöht das Verfahren die Kapazität des Arbeitssystems [Bege05, S. 67ff.]. Das Verfahren beinhaltet relativ viele Verfahrensparameter und ist somit in der Anwendung komplex. Zudem er-

folgt die Berechnung der Terminabweichung nur für ein Arbeitssystem. Das Verfahren kann nicht prognostizieren, ob ein verspäteter Auftrag an nachfolgenden Systemen noch durch eine Reihenfolgebildung termintreu fertiggestellt werden kann. In einem solchen Fall wäre die aufwändige Kapazitätsanpassung überflüssig [Lödd16, S. 583].

### **Fazit**

Aus dem Modell der Fertigungssteuerung (Abschn. 2.3.2) lässt sich eine einfache Grundkonfiguration für eine Fertigung mit einer hohen Termintreue ableiten: Rückstände und Reihenfolgeabweichungen sind zu vermeiden. Eine planorientierte Kapazitätssteuerung vermag im Gegensatz zu den anderen Verfahren nicht, alle Ursachen von Rückstand zu beseitigen, sie ist jedoch sinnvoll und sehr einfach zu implementieren. Zudem ist sie bereits Teil der operativen Kapazitätssteuerung vieler Unternehmen. Die Rückstandsregelung und die terminorientierte Kapazitätssteuerung sind dazu in der Lage, Rückstände zu beseitigen. Die terminorientierte Kapazitätssteuerung ist im Vergleich zur Rückstandsregelung in ihrer Funktion und Implementierung etwas komplexer. In der Simulation soll daher eine Kombination aus Planorientierter Kapazitätssteuerung und Rückstandsregelung überprüft werden.

### **4.3 Zusammenfassung**

Für die Auftragsannahme und -terminierung konnten vier Kriterien identifiziert werden. Für Auftragsfertiger ist

- eine Rückwärtsterminierung
- auf Basis von Arbeitsvorgangsdurchlaufzeiten
- in die unbegrenzte Kapazität
- mit einem Kapazitätsabgleich

zu bevorzugen.

Für die Steuerungsaufgaben Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung konnten jeweils zwei mögliche Verfahrensalternativen identifiziert werden: *Conwip-Regelung* bzw. *Auftragsfreigabe nach Termin* als Verfahren zur Auftragsfreigabe und die *FIFO-Steuerung* bzw. *die Reihenfolgebildung nach frühestem Planendtermin* für die Reihenfolgebildung. Für die *Kapazitätssteuerung* bietet sich lediglich die *Rückstandsregelung* als effektives und gleichzeitig einfaches Verfahren an. Tab. 4-1 fasst die Ergebnisse der Konfiguration der Fertigungssteuerung zusammen.

**Tab. 4-1:** Ergebnisse der Konfiguration der Fertigungssteuerung

<b>Aufgabe</b>	<b>Verfahrensalternativen</b>	
	<b>Verfahren 1</b>	<b>Verfahren 2</b>
Auftragsfreigabe	Freigabe nach Termin	Conwip-Freigabe
Reihenfolgebildung	Reihenfolgebildung nach FIFO	Reihenfolgebildung nach FPE
Kapazitätssteuerung	Rückstandsregelung, Planorientierte Kapazitäts- steuerung.	-

## 5 Evaluierung der Konfiguration in der Simulation

In diesem Kapitel soll die Wirksamkeit der zuvor ausgewählten Fertigungssteuerungsverfahren mit Hilfe der Simulation untersucht werden. Abschnitt 5.1 beschreibt dafür den Aufbau des Simulationsmodells. Zentraler Bestandteil des Modells ist die Auftragsannahme und -terminierung, die sich aus eigenständig programmierten Methoden zusammensetzt und daher besonders fehleranfällig ist. Abschnitt 5.2 dient allein der Verifikation dieses Moduls. Anschließend stellt Abschnitt 5.3 den Versuchsplan mit Stör- und Einflussgrößen vor, bevor Abschnitt 5.4 die Ergebnisse der Evaluierung präsentiert. Abschnitt 5.5 liefert abschließend eine kurze Zusammenfassung der Evaluierung.

### 5.1 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell soll die Komplexität einer realen Fertigung abbilden und dennoch beherrschbar sein, um produktionslogistische Zusammenhänge transparent abzubilden. Die Simulation wird mit Technomatix Plant Simulation Version 10 durchgeführt. Abb. 5-1 zeigt eine Übersicht des Modells.

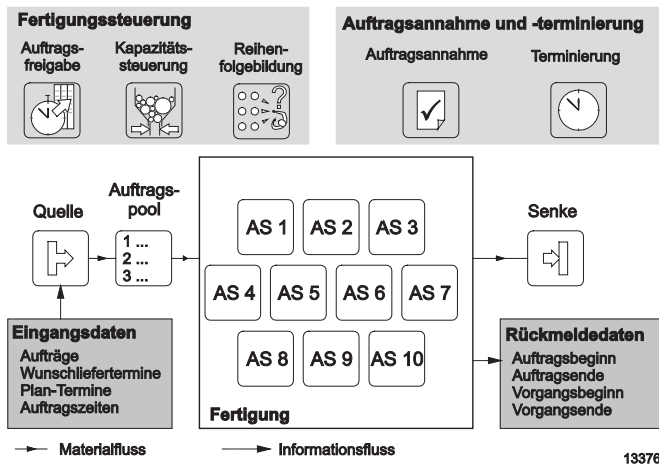


Abb. 5-1: Aufbau des Simulationsmodells

### **Struktur der Fertigung**

Das Modell bildet die Werkstattfertigung eines Auftragsfertigers ab. Die Fertigung besteht aus zehn Arbeitssystemen, die jeweils aus einem Sortierer zur Reihenfolgebildung und einem Prozess bestehen. Die Arbeitssysteme werden einschichtig mit einer Kapazität von acht Stunden betrieben. Aufträge werden nach der Fertigstellung an einem Arbeitssystem in die Warteschlange des nachfolgenden Systems umgelagert. In der Praxis notwendige Transportvorgänge entfallen ebenso wie prozessbedingte Liegezeiten. Die Materialflusskomplexität wird durch eine hohe Produktvarianz erzeugt. Insgesamt werden auf den zehn Arbeitssystemen 50 Produkte mit unterschiedlichen Arbeitsplänen gefertigt. Die Anzahl der Arbeitsvorgänge kann je nach Produkt zwischen einem und zwölf Arbeitsschritten variieren.

### **Eingangsdaten der Simulation**

Ein Kundenmodul erzeugt per Zufallsauswahl Produkthanfragen. Die Wunschtermine sind nach unten durch die Durchlaufzeit des angefragten Produkts begrenzt und liegen im Maximum bei der Durchlaufzeit zuzüglich 14 Kalendertagen. Der Kunde kennt also die Durchlaufzeiten der Produkte und fragt diese eher kurzfristig an. Die Nachfrage ist so eingestellt, dass etwa 70 % der Anfragen mit der vorhandenen Kapazität angenommen werden können. Durch diese überhöhte Nachfrage soll eine durchgehend hohe Auslastung der Fertigung sichergestellt werden. Anfragen werden täglich über eine Erlang-verteilte Zufallszahl erzeugt.

### **Auftragsannahme und -terminierung**

Das Modul zur Auftragsannahme und -terminierung plant Kundenanfragen ein oder lehnt diese ab. Zunächst wird ausgehend vom Kundenwunschtermin eine Rückwärtsterminierung mit konstanten Plan-Durchlaufzeiten je Arbeitssystem vorgenommen. Die Plan-Durchlaufzeit der Arbeitssysteme beträgt standardmäßig einen Betriebskalendertag, kann jedoch individuell eingestellt werden. Die Durchlaufterminierung erzeugt in diesem Fall den Plan-Starttermin des Auftrags und zugleich die Plan-Termine der Arbeitsvorgänge. Anschließend werden die Aufträge für jedes Arbeitssystem und jede Planungsperiode in Kapazitätskonten eingetragen, um den Kapazitätsbedarf tagesgenau für die Arbeitssysteme zu bestimmen. Übersteigt der Kapazitätsbedarf das Kapazitätsangebot der Ressourcen, können Arbeitsvorgänge um maximal einen Tag in eine frühere oder spätere Planungsperiode verschoben werden. Gelingt dies nicht, werden die Aufträge abgelehnt. Die Ablehnung von Anfragen stellt sicher, dass ein umsetzbares Produktionsprogramm erzeugt wird.

### **Fertigungssteuerung**

Die Fertigungssteuerung umfasst in der Simulation die Aufgaben Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung.

Die *Auftragsfreigabe* wird über einen separaten Sortierer realisiert, dem die Aufträge nach ihrer Terminierung zugehen. Der Sortierer repräsentiert somit einen Auftragspool mit freizugebenden Aufträgen. Bei der Auftragsfreigabe nach Termin wird der Auftrag vom Sortierer freigegeben, sobald der in der Auftragsannahme und -terminierung festgelegte Start-Termin erreicht ist. Bei der Conwip-Regelung gibt der Sortierer den Auftrag erst frei, wenn der zuvor festgelegte Plan-Bestand unterschritten wird. Der Plan-Bestand liegt für diese Fertigung bei 30 Aufträgen.

Der Baustein *Kapazitätssteuerung* legt fest, ob die Rückstandssteuerung aktiviert werden soll. Hierfür wird der kumulierte Ist-Abgang jedes Arbeitssystems erfasst und dem in der Terminierung festgelegten kumulierten Plan-Abgang in einer Tabelle gegenübergestellt. Bei positiven Abweichungen verlängert sich die Arbeitszeit des betroffenen Arbeitssystems um diesen Betrag. Die Kapazitätsflexibilität ist in diesem Fall sehr hoch und kann Rückstände sehr kurzfristig beseitigen.

Für die *Reihenfolgebildung* an einem Arbeitssystem werden die Aufträge im Sortierer nach dem vom Benutzer festgelegten Kriterium sortiert. Die FIFO-Reihenfolgebildung kann durch eine bereits vorhandene Sortierreihenfolge abgedeckt werden. Für die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin werden jedem Auftrag die geplanten Endtermine aller Arbeitsvorgänge als Information angehängt. Der Sortierer bestimmt dann entsprechend dieser Termine die Reihenfolge der Aufträge.

### **Rückmeldedaten**

In der Simulation melden die Arbeitssysteme durchgehend Auftragsinformationen zurück. Dies sind die geplanten und tatsächlichen Termine auf Auftrags- und Arbeitsvorgangsebene sowie die Auftragszeiten aller Arbeitsvorgänge. Aus diesen Daten lassen sich anschließend die relevanten logistischen Kennzahlen erstellen.

## **5.2 Verifikation der Auftragsannahme und -terminierung**

Die Simulation soll ein System mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell abbilden, um Wissen über ein System zu gewinnen, das sich auch in die Wirklichkeit übertragen lässt [VDI18]. Um dieses Wissen auch nutzen zu können und um keine fehlerhaften Aussagen abzuleiten, muss nachgewiesen werden, dass das erstellte

Modell auch formal korrekt ist. Dies geschieht in der Verifikation. Rabe definiert die Verifikation von Simulationsmodellen wie folgt [Rabe08, S. 14]:

*„Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde.“*

Die Verifikation bezieht sich auf alle Bereich des Modells und bedeutet plakativ formuliert die Antwort auf folgende Frage: „Macht das Modell, was es soll?“. Eine umfassende Verifikation ist aufgrund der Komplexität von Simulationsmodellen nicht umsetzbar [Rabe08, S. 14], es existieren jedoch viele Methoden, die den Modellersteller bei der Verifikation unterstützen.

Ein wesentliches Verfahren zur Funktionsabsicherung von Simulationsmodellen ist die *Black-Box-Methode* („*Functional Testing*“). Diese Methode bewertet, wie das betrachtete System Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen transformiert [Balci98, S. 367f.]. Um verlässliche Aussagen über das komplexe Systemverhalten treffen zu können, sollte die Methode in ein systematisches Vorgehen eingebettet werden. Hierfür bietet sich ein Festwerttest an. Der Festwerttest stellt im Simulationsmodell für zu überprüfende Variablen konstante Werte ein, um aus dem stochastischen Modell ein deterministisches zu machen, für das sich Vorhersagen treffen lassen [Rabe08, S. 99].

### **Schritt 1: Vereinfachungen in der Modellstruktur**

Folgende Vereinfachungen werden für den Grenzwerttest vorgenommen:

1. Produktvarianz: Die Anzahl der Produkte wird auf ein Produkt begrenzt.
2. Arbeitsplan: Das Produkt läuft über die Arbeitssysteme 1 bis 10 in aufsteigender Reihenfolge und ohne Rückflüsse.
3. Kapazität: Die Kapazität aller Arbeitssysteme beträgt 12 Stunden und es treten keine Störungen auf.
4. Auftragszeit: Die Auftragszeit aller Arbeitsvorgänge beträgt genau eine Stunde.
5. Kundenanfragen: Die Kundenanfragen unterliegen keiner Verteilung, sondern es treffen täglich genau zwölf Anfragen ein.
6. Lieferzeit: Die angeforderte Lieferzeit für das Produkt unterliegt keiner Verteilung, sondern entspricht für alle Anfragen genau der Durchlaufzeit des Produkts.
7. Durchlaufzeit: Die Plan-Durchlaufzeit beträgt an allen Arbeitssystemen einen Kalendertag

## **Schritt 2: Hypothesenbildung**

Die genannten Vereinfachungen lassen Rückschlüsse auf das Systemverhalten zu, die in Form von Hypothesen formuliert werden. Anschließend wird in einem Simulationslauf geprüft, ob diese Hypothesen zutreffen.

*Hypothese 1:* Annahmquote und Kapazitätsauslastung betragen jeweils 100 %.

Da der Arbeitsinhalt der Kundenanfragen zu jedem Zeitpunkt genau der Kapazität der Fertigung entspricht, ist davon auszugehen, dass ohne Störungen der Arbeitssysteme die Kapazitätskonten mit den vorhandenen Aufträgen genau gefüllt werden können. Dies setzt einen entsprechenden Anfangsbestand aller Arbeitssysteme voraus.

*Hypothese 2:* Der mittlere Umlaufbestand bei einer Auftragsfreigabe nach Termin ist etwas höher als bei einer Conwip-Freigabe.

Der Plan-Bestand beträgt je Arbeitssystem bei der vorliegenden Auftragszeitstruktur zwölf Aufträge. Die Auftragsfreigabe nach Termin erfolgt jedoch tages- und somit stoßweise, während der Abgang aufgrund des linearen Materialflusses kontinuierlich erfolgt. Dies führt bei einer Auftragsfreigabe nach Termin dazu, dass zu Schichtbeginn der Auftragsbestand höher ist als zu Schichtende. Bei einer Conwip-Steuerung entfällt dieser Effekt, da Aufträge kontinuierlich freigegeben werden können.

*Hypothese 3:* Die Auftrags-Durchlaufzeit beträgt zehn Kalendertage.

Die Aufträge werden mit einer Plan-Durchlaufzeit von einem Kalendertag je Arbeitssystem eingeplant. Die geplante Auftragsdurchlaufzeit beträgt für jeden Auftrag zehn Kalendertage. Die tatsächliche Durchlaufzeit beträgt bei einer Auftragsfreigabe nach Termin daher im Mittel zehn Kalendertage und unterliegt einer sehr geringen Streuung. Bei einer Conwip-Steuerung, die einen Umlaufbestand von 120 Aufträgen definiert, ist keinerlei Streuung der Durchlaufzeit zu erwarten.

*Hypothese 4:* Die Termintreue beträgt 100 %.

Da eine exakte Abstimmung von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot besteht und die Fertigung ohne Störungen arbeitet, ist zu erwarten, dass alle Aufträge termintreu fertiggestellt werden können. Der Einfluss der Reihenfolgebildung ist dabei aufgrund der einfachen Auftragsstruktur vernachlässigbar. Es ist zu erwarten, dass die FIFO-Reihenfolgebildung und die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge zu den gleichen Ergebnissen führen.

### **Schritt 3: Durchführung der Simulation zur Überprüfung der Hypothesen**

Der Simulationslauf erfolgt über 300 Kalendertage und soll die formulierten Hypothesen bestätigen. Dieser Ansatz ist nicht in der Lage, die Verifikation des Modells vollständig durchzuführen, bietet aber ein gute Möglichkeit, die Funktionsweise der Auftragsannahme und -terminierung zu überprüfen.

Tab. 5-1 zeigt die Ergebnisse der Verifikationsläufe der Simulation. In zwei Simulationsläufen konnten die oben genannten Hypothesen belegt werden. In beiden Fällen werden 100 % der Aufträge angenommen und die mittlere Auslastung der Arbeitssysteme beträgt ebenfalls 100 %. Wie bereits vermutet, ist der mittlere Bestand in Anzahl Aufträgen bei einer Freigabe nach Plan-Starttermin größer als 120, da jeden Tag zwölf Aufträge zeitgleich freigegeben werden und der Umlaufbestand auf 132 Aufträge steigt. Im Laufe der Schicht werden zwölf Aufträge fertiggestellt, sodass der Bestand zu Schichtende wieder bei 120 Aufträgen liegt. Dies führt zu einem mittleren Bestand von 126 Aufträgen und einer Standardabweichung von 3,5 Aufträgen. Der im Vergleich zum Plan-Bestand leicht erhöhte Ist-Bestand führt zu einer mittleren Auftragsdurchlaufzeit von 10,2 BKT. Die Conwip-Steuerung hält den Bestand konstant bei 120 Aufträgen, sodass auch die Auftragsdurchlaufzeit keiner Streuung unterliegt und im Mittel genau 10 BKT beträgt. Die Terminabweichung ist, abweichend zur Hypothese, größer Null. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Plan-Endtermine der Aufträge in der Terminierung nur tagesgenau festgelegt, die Ist-Endtermine jedoch minutengenau gemessen werden. Zudem wurde in beiden Versuchsreihen jeweils die Reihenfolgeregel variiert (FIFO und FPE). In beiden Fällen führte dies zu den gleichen Ergebnissen.

**Tab. 5-1:** Ergebnisse der Simulationsläufe zur Verifikation der Auftragsannahme und -terminierung

Logistische Größen		Einheit	Ergebnisse	
			Auftragsfreigabe nach Termin	Conwip-Freigabe
Annahmequote	AQ	[%]	100	100
Mittler Auslastung der Arbeitssysteme	$A_m$	[%]	100	100
Mittlere Durchlaufzeit der Aufträge	$ZDA_m$	[BKT]	10,2	10,0
Standardabweichung der Auftragsdurchlaufzeit	$ZDA_s$	[BKT]	0,1	0
Mittelwert der Terminabweichung	$TAA_m$	[BKT]	0,3	0,3
Standardabweichung der Terminabweichung	$TAA_s$	[BKT]	0,1	0,1
Mittlerer Bestand (Anzahl Aufträge)	$BA_m$	[-]	126	120
Standardabweichung des Bestands	$BA_s$	[-]	3,5	0

### 5.3 Versuchsplan

Ausgehend von einer qualitativen Vorauswahl der Methoden soll dieser Abschnitt die Wirksamkeit des Wertstromdesigns belegen. Dafür werden verschiedene Kombinationen von Methoden systematisch getestet. Ziel ist es, in einer komplexen Fertigung eine möglichst hohe logistische Zielerreichung mit den Methodenkombinationen zu erreichen, was sinngemäß einem Proof of Concept entspricht. Es werden daher auch nicht alle Methodenkombinationen getestet, sondern sinnvolle Kombinationen gebildet und getestet. Variiert werden die Aufgaben der Fertigungssteuerung und die Störgrößen. Als Störgrößen werden Reihenfolgevertauschung im Zugang zur Fertigung und Rückstände in der Fertigung provoziert.

In den Versuchen 1 und 2 soll zunächst untersucht werden, welche *Reihenfolgebildung* bei komplexen Materialflüssen in einer störungsfreien Werkstattfertigung zu den besseren Ergebnissen führt. Die Versuche 3 und 4 sollen untersuchen, wie sich die beiden Verfahren der Reihenfolgebildung bei Terminabweichungen im Zugang verhalten.

Die Versuche 5 bis 8 sollen zeigen, dass die Freigabeverfahren bei Rückstand unterschiedliche Wirkungen auf die logistischen Zielgrößen besitzen. Es ist davon auszugehen, dass beide Verfahren keinen unmittelbaren Effekt auf die Terminabweichung im Abgang

besitzen. Jedoch ist zu vermuten, dass die bestandsregelnde Auftragsfreigabe zu deutlich kürzeren und stabileren Durchlaufzeiten führt.

Anschließend sollen die Versuche 9 bis 11 untersuchen, welchen Effekt die *Kapazitätssteuerung* in Form einer Rückstandsregelung auf die Terminabweichung hat und mit welchem Verfahren der Auftragsfreigabe die Rückstandsregelung am effektivsten unterstützt wird.

Tab. 5-2 zeigt den Versuchsplan zu Ermittlung der Standardkonfiguration der Fertigungssteuerung.

**Tab. 5-2:** Varianten der Fertigungssteuerungskonfiguration

Ver-such	Fertigungssteuerung			Störungen	
	Auftragsfrei-gabe	Reihenfolgebil-dung	Rückstandsrege-lung	Terminabwei-chung im Zu-gang	Rück-stand der Fer-tigung
1	nach Termin	FIFO	nein	nein	nein
2	nach Termin	FPE	nein	nein	nein
3	nach Termin	FIFO	nein	ja	nein
4	nach Termin	FPE	nein	ja	nein
5	nach Termin	FIFO	nein	nein	ja
6	nach Termin	FPE	nein	nein	ja
7	Conwip	FIFO	nein	nein	ja
8	Conwip	FPE	nein	nein	ja
9	Conwip	FPE	ja	nein	ja
10	nach Termin	FPE	nein	ja	ja
11	nach Termin	FPE	ja	ja	ja

#### 5.4 Evaluierung einer Referenzkonfiguration

Für die Evaluierung ergeben sich drei Schwerpunkte, die sich an den Aufgaben der Fertigungssteuerung orientieren:

- Evaluierung der Reihenfolgebildung (Abschnitt 5.4.1)
- Evaluierung der Auftragsfreigabe (Abschnitt 5.4.2)
- Evaluierung der Kapazitätssteuerung (Abschnitt 5.4.3)

### 5.4.1 Evaluierung der Reihenfolgebildung

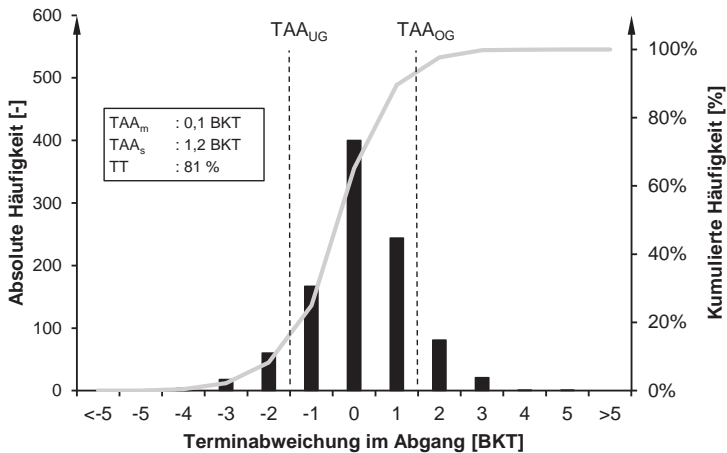
Die Evaluierung der Reihenfolgebildung umfasst vier Versuche. Die Versuche 1 und 2 sollen eine störungsfreie Fertigung simulieren, um rückstandsbedingten Einflüsse auf die Terminabweichung und die Durchlaufzeit auszuschließen. Die Versuche 3 und 4 überprüfen, wie die Methoden der Reihenfolgebildung auf Reihenfolgevertauschungen im Zugang reagieren. Dafür werden die eingeplanten Aufträge mit einer Zugangsterminabweichung beaufschlagt. Der Mittelwert der Terminabweichung im Zugang beträgt 0,1 BKT und die Standardabweichung 3,5 BKT. In allen Versuchen soll eine Auftragsfreigabe nach Termin Anwendung finden. Tab. 5-3 gibt einen Überblick über diese Versuchsreihe.

**Tab. 5-3:** Planung der Simulationsversuche zur Evaluierung der Reihenfolgebildung

Störgröße		Steuerungskonfiguration	
Bezeichnung	Wert	AFT, FIFO	AFT, FPE
Keine	-	Versuch 1	Versuch 2
Terminabweichung im Zugang (TAZ)	$TAZ_m = 0,1 \text{ BKT}$	Versuch 3	Versuch 4
	$TAZ_s = 3,5 \text{ BKT}$		

- AFT : Auftragsfreigabe nach Termin
- FIFO : Reihenfolgebildung First-In-First-Out
- FPE : Reihenfolgebildung Frühester Plan-Endtermin

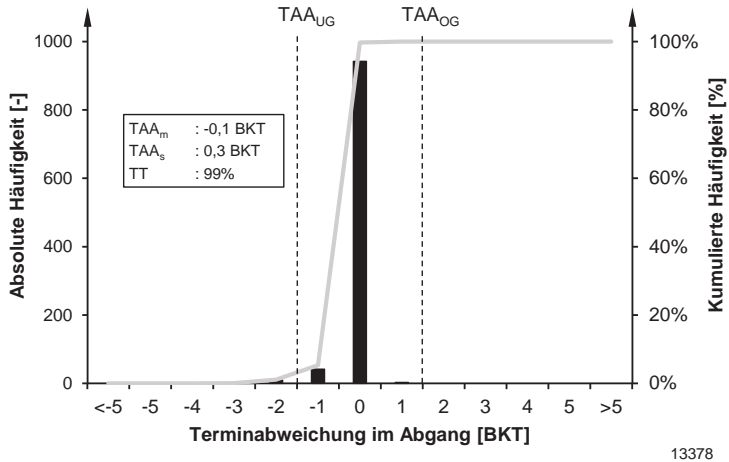
In Versuch 1 werden die Aufträge freigegeben, sobald der geplante Starttermin erreicht ist. Anschließend erfolgt an allen Arbeitssystemen eine FIFO-Sortierung. Es ist zu sehen, dass bei einer Termintoleranz von +/- 1 BKT nur etwa 81 % der Aufträge termintreu fertiggestellt werden, obwohl keine Störungen in Form von Zugangsterminabweichungen oder Rückstände der Arbeitssysteme vorliegen. Im Mittel beträgt die Terminabweichung auch lediglich 0,1 BKT. Die niedrige Termintreue der Fertigung liegt in diesem Versuch in der Streuung der Terminabweichung im Abgang begründet. Diese ist mit einer Standardabweichung von 1,2 BKT relativ hoch. Die Begründung hierfür liegt in der Termin- und Kapazitätsplanung. Diese führt im Sinne einer hohen Auslastung der Arbeitssysteme einen Belastungsabgleich durch und verschiebt einzelne Arbeitsvorgänge im Rahmen des Wunschliefertermins in andere Perioden. Dadurch ergeben sich für bestimmte Arbeitsvorgänge längere oder kürzere Plan-Durchlaufzeiten gegenüber der Ist-Durchlaufzeit des Arbeitssystems. Die FIFO-Reihenfolgebildung berücksichtigt die Plan-Termine bzw. -Durchlaufzeiten nicht und stellt daher einige Aufträge verfrüht und einige verspätet fertig. Abb. 5-2 zeigt die resultierende Verteilung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung für die Reihenfolgebildung nach FIFO.



13377

**Abb. 5-2:** Terminabweichung der Aufträge für Versuch 1 (FIFO)

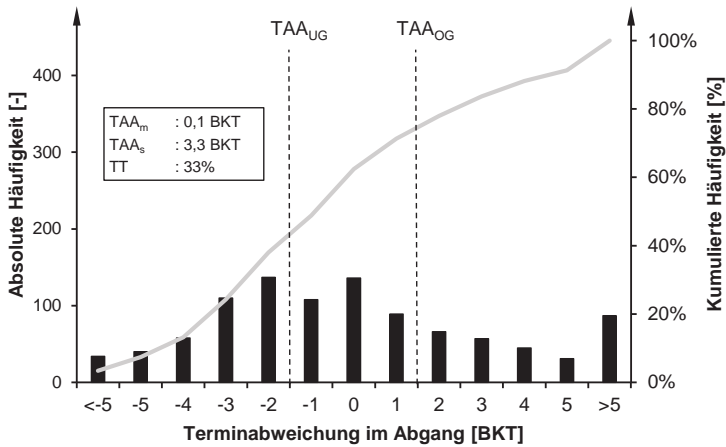
In Versuch 2 werden die Aufträge ebenfalls störungsfrei nach Termin freigegeben und an den Arbeitssystemen nach ihren Plan-Endterminen sortiert. Abb. 5-3 zeigt im Vergleich das Histogramm der Terminabweichungen aller Aufträge bei einer Reihenfolgebildung nach dem Frühesten Plan-Endtermin (Versuch 2). Auch in diesem Versuch ist der Mittelwert der Terminabweichung sehr niedrig und liegt leicht im negativen Bereich bei -0,1 BKT. In diesem Versuch kann die Reihenfolgebildung (nach Plan-Endtermin) die Belastungsverschiebung ausgleichen, was eine geringe Standardabweichung der Terminabweichung (0,5 BKT) und eine entsprechend hohe Termintreue (99 %) zur Folge hat.



**Abb. 5-3:** Terminabweichung der Aufträge für Versuch 2 (FPE)

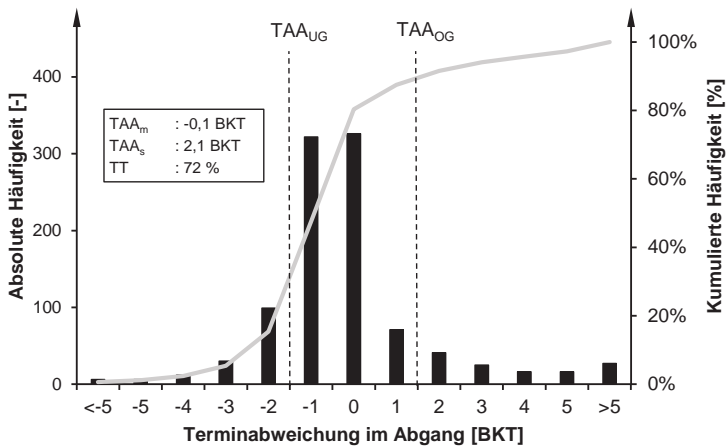
Versuch 3 untersucht, wie sich die Fertigung bei einer Terminabweichung im Zugang und einer FIFO-Reihenfolgebildung verhält. Abb. 5-4 zeigt die Verteilung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung für die FIFO-Reihenfolgebildung. Die Streuung der Terminabweichung im Abgang bleibt im Vergleich zum Zugang nahezu identisch (vgl. Tab. 5-3). Der Mittelwert der Terminabweichung bleibt unverändert. Die Termintreue beträgt aufgrund der großen Streuung der Terminabweichung im Abgang nur 33 %.

Die resultierende Terminabweichung im Abgang für Versuch 4 zeigt Abb. 5-5. Im Vergleich zur Reihenfolgebildung nach FIFO kann mit der Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin noch ein großer Anteil an Aufträgen termintreu fertiggestellt werden (TT = 72 %). Die Streuung der Terminabweichung im Abgang wird im Vergleich zur Streuung im Zugang deutlich reduziert. Die Standardabweichung der Terminabweichung im Abgang beträgt in diesem Fall 2,1 BKT.



13379

Abb. 5-4: Terminabweichung im Abgang für Versuch 3 (FIFO)



13380

Abb. 5-5: Terminabweichung im Abgang bei Versuch 4 (FPE)

Zusammenfassend lässt sich für die Reihenfolgebildung festhalten, dass die Reihenfolgebildung nach dem frühesten Plan-Endtermin der FIFO-Reihenfolgebildung in entscheidenden Punkten überlegen ist. Die FPE-Regel unterstützt in beiden Szenarien aktiv eine hohe Termintreue in der Fertigung:

1. Selbst im Falle einer rückstandsfreien Fertigung, die zudem keine Reihenfolgevertauschungen im Zugang aufweist, ist die FIFO-Reihenfolgebildung nicht in der Lage, eine hohe Termintreue sicherzustellen. Dies liegt im Wesentlichen an Planungsungenauigkeiten: In der Termin- und Kapazitätsplanung findet ein Belastungsabgleich statt, sodass ein Teil der Arbeitsvorgänge gegenüber dem Plan-Termin einen Tag vorgezogen oder nach hinten verschoben werden können. Die FIFO-Logik kann die dadurch entstehenden Terminabweichungen nicht mehr aufholen, sodass sich die Terminabweichungen im Verlauf des Auftragsdurchlaufs aufschaukeln.
2. Treten zudem Reihenfolgevertauschungen im Zugang auf, ist eine FIFO-Logik nicht in der Lage, diese auszugleichen. Die Streuung der Terminabweichung im Zugang ist in diesem Fall nahezu identisch mit der Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung. Die Reihenfolgebildung nach dem frühesten Plan-Endtermin der Aufträge kann diese Streuung im Zugang abschwächen. Das Vermögen, die Zugangsstreuung auszugleichen ist dabei abhängig vom Bestand der Fertigung. Je größer der Bestand ist, desto größer ist auch der Effekt, der durch Reihenfolgevertauschungen erzielt werden kann [Lödd17, S. 5].

Eine Übersicht der Ergebnisse aus den Simulationsversuchen 1 bis 4 gibt Tab. 5-4.

**Tab. 5-4:** Ergebnisse der Versuche 1 bis 4

Versuch	TAZ <sub>m</sub>	TAZ <sub>s</sub>	TAA <sub>m</sub>	TAA <sub>s</sub>	TT
	[BKT]	[BKT]	[BKT]	[BKT]	[%]
1 (FIFO)	0	0	0,1	1,2	81
2 (FPE)	0	0	-0,1	0,3	99
3 (FIFO)	0,5	3,5	0,1	3,3	33
4 (FPE)	0,5	3,5	-0,1	2,1	72

TAZ<sub>m</sub> : Mittlere Terminabweichung im Zugang  
 TAZ<sub>s</sub> : Standardabweichung der Terminabweichung im Zugang  
 TAA<sub>m</sub> : Mittlere Terminabweichung im Abgang  
 TAA<sub>s</sub> : Standardabweichung der Terminabweichung im Abgang  
 TT : Termintreue

### 5.4.2 Evaluierung der Auftragsfreigabe

Die Versuche 5 bis 8 dienen der Evaluierung der Auftragsfreigabeverfahren „Conwip“ und „Auftragsfreigabe nach Termin“. Die Conwip-Steuerung legt die Bestandsobergrenze der Fertigung auf 30 Aufträge fest. Beide Verfahren werden wiederum mit der FIFO-Reihenfolgebildung verknüpft. In allen Versuchen provozieren Störungen an den Arbeitssystemen einen Rückstand der Fertigung und die Rückstandsregelung bleibt deaktiviert.

Die tatsächlich verfügbare Kapazität der Arbeitssysteme wird durch die Störungen in allen Versuchen auf 95 % der verplanten Kapazität reduziert. Die Verfügbarkeit bezieht sich dabei auf die geplante Arbeitszeit des Systems und nicht auf die absolute Simulationszeit. Wie in der ersten Versuchsreihe beträgt der Simulationszeitraum 300 BKT. Die Auftragsannahme und -terminierung erfolgt nach dem in Abschnitt 5.1 erläuterten Vorgehen. Es ergeben sich für die Evaluierung der Auftragsfreigabe die in Tab. 5-5 aufgezeigten Versuche.

**Tab. 5-5:** Planung der Simulationsversuche zur Evaluierung der Auftragsfreigabe

Störung	Steuerungskonfiguration			
	AFT, FIFO	Conwip, FIFO	AFT, FPE	Conwip, FPE
Rückstand	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8

AFT : Auftragsfreigabe nach Termin  
 FIFO : Reihenfolgebildung First-In-First-Out  
 FPE : Reihenfolgebildung Frühester Plan-Endtermin

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier Simulationsläufe diskutiert. In allen Fällen werden etwa 37 % der Aufträge angenommen und die mittlere Leistung der Fertigung liegt bei etwa 44 Std/BKT. Der mittlere Rückstand schwankt in den verschiedenen Versuchen zwischen 258,6 Std und 287,4 Std. Wie zu erwarten liegt der mittlere Bestand bei einer Auftragsfreigabe nach Termin im Mittel deutlich über dem mittleren Bestand einer Conwip-Freigabe. Unabhängig von der angewendeten Reihenfolgeregel liegt der mittlere Bestand bei Anwendung der Conwip-Steuerung bei etwa 470 Std. Der Bestand bei Anwendung der Auftragsfreigabe nach Termin liegt bei 654,7 Std (FPE) bzw. bei 669,2 Std (FIFO), was bei störungsfreiem Auftragszugang auf die unterschiedlichen Rückstandswerte zurückzuführen ist [Lödd16, S. 342]. Tab. 5-6 fasst die Ergebnisse der fertigungsspezifischen Kennzahlen für die Versuche 5 bis 8 zusammen.

**Tab. 5-6:** Fertigungsspezifische Kennzahlen der Versuche 5 bis 8

Versuch	AQ	LA <sub>m</sub>	L <sub>m</sub>	B <sub>m</sub>	RS <sub>m</sub>	RS <sub>s</sub>
5 (AFT, FIFO)	37 %	3,2	44,2	669,2	287,4	164,5
6 (Conwip, FIFO)	37 %	3,2	44,1	470,6	259,4	152,3
7 (AFT, FPE)	37 %	3,2	44,2	654,7	261,0	162,3
8 (Conwip, FPE)	37 %	3,2	44,2	467,9	258,6	162,5

AQ : Annahmequote [%]  
 LA<sub>m</sub> : Mittlere Leistung in Anzahl Aufträge [1/BKT]  
 L<sub>m</sub> : Mittlere Leistung [Std/BKT]  
 B<sub>m</sub> : Mittlerer Bestand [Std]  
 RS<sub>m</sub> : Mittlerer Rückstand [Std]

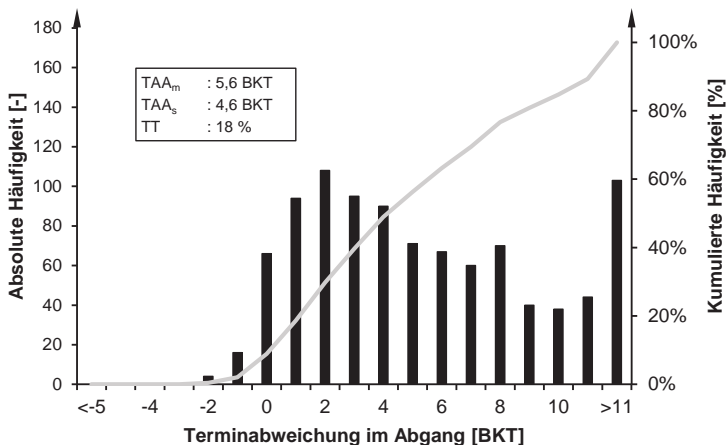
Tab. 5-7 zeigt die auftragsspezifischen Kennzahlen der Simulationsläufe. Die mittlere Durchlaufzeit liegt aufgrund der niedrigeren Bestandsniveaus erwartungsgemäß bei einer Conwip-Steuerung unterhalb der mittleren Durchlaufzeit bei einer Freigabe nach Termin.

**Tab. 5-7:** Auftragspezifische Kennzahlen der Versuche 5 bis 8

Versuch	TAZ <sub>m</sub>	TAA <sub>m</sub>	TAA <sub>s</sub>	ZDA <sub>m</sub>	ZDA <sub>s</sub>	TT
5 (AFT, FIFO)	0	5,6	4,6	13,2	6,4	18
6 (Conwip, FIFO)	4,2	5,7	4,0	9,1	4,0	13
7 (AFT, FPE)	0	5,8	3,9	13,3	5,1	16
8 (Conwip, FPE)	4,3	5,8	3,8	9,1	3,7	15

TAZ : Terminabweichung im Zugang [BKT]  
 TAA : Terminabweichung im Abgang [BKT]  
 ZDA : Auftragsdurchlaufzeit [BKT]  
 TT : Termintreue [%]

Versuch 5 kombiniert die Auftragsfreigabe nach Termin mit der FIFO-Reihenfolgebildung bei einem Rückstand der Fertigung. Abb. 5-6 zeigt die Verteilung der Terminabweichung im Abgang. Ein mittlerer Rückstand von 287,4 Std führt zu einer mittleren Terminabweichung im Abgang von 5,6 BKT. Die Terminabweichung streut in diesem Fall mit einer Standardabweichung von 4,6 BKT.



13381

**Abb. 5-6:** Terminabweichung im Abgang für Versuch 5 (Auftragsfreigabe nach Termin, FIFO-Reihenfolgebildung)

Zum Vergleich zeigt Abb. 5-7 die Verteilung der Terminabweichung im Abgang für eine Kombination aus Conwip-Steuerung und der FIFO-Reihenfolgebildung (Versuch 6). Diese Konfiguration führt zu einer mittleren Terminabweichung von 5,7 BKT und einer Standardabweichung der Terminabweichung von 4,0 BKT. Die geringere Streuung der Terminabweichung im Abgang ist in diesem Fall auf eine geringere Rückstandsstreuung zurückzuführen. Die Standardabweichung des Rückstands beträgt in Versuch 6 152,3 Std.

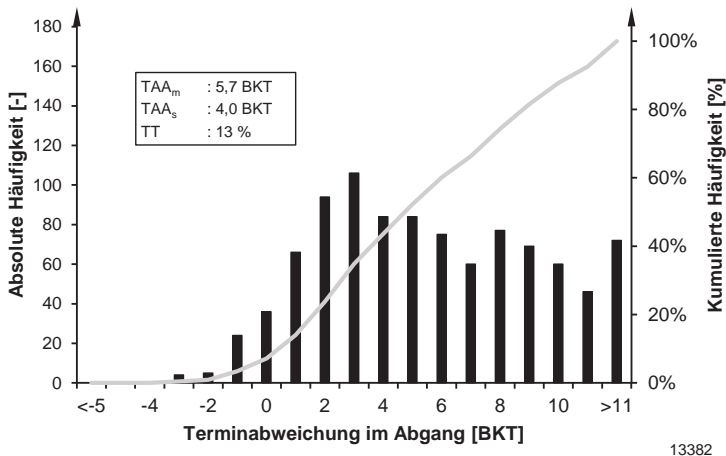
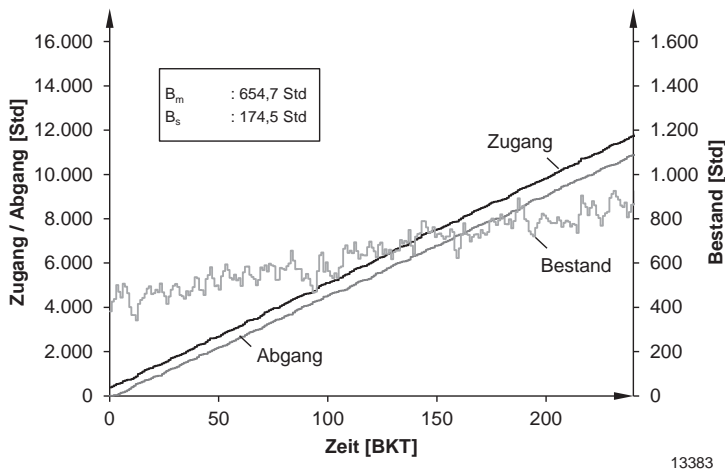


Abb. 5-7: Terminabweichung im Abgang für Versuch 6 (Conwip-Freigabe, FIFO-Reihenfolgebildung)

Auffällig in dieser Versuchsreihe ist der Unterschied in der mittleren Auftragsdurchlaufzeit zwischen den Versuchen mit einer Auftragsfreigabe nach Termin (Versuche 5 und 7) und den Versuchen mit einer Conwip-Steuerung (Versuche 6 und 8). Dies ist auf die unterschiedlichen mittleren Bestände in den Versuchen zurückzuführen. In den Versuchen mit einer Auftragsfreigabe nach Termin liegt der mittlere Bestand bei 669,2 Std (Versuch 5) bzw. bei 654,7 Std (Versuch 7). Die Versuche mit einer Conwip-Steuerung führen bei ähnlichen Rückstandswerten zu deutlich geringeren mittleren Beständen: 470,6 Std in Versuch 6 und 467,9 Std in Versuch 8. Eine Conwip-Steuerung führt zu niedrigeren Beständen und infolgedessen zu kürzeren Durchlaufzeiten.

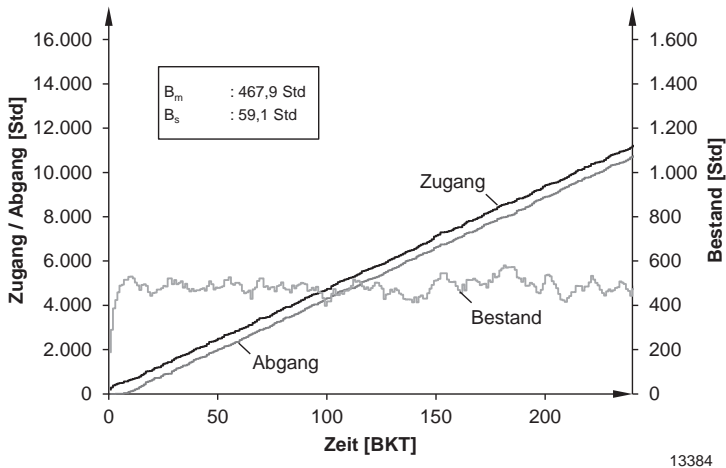
Abb. 5-8 zeigt das Durchlaufdiagramm für Versuch 7. Es ist zu sehen, dass der vertikale Abstand zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve über den Simulationszeitraum zunimmt. Dies ist auf die gegenüber dem Plan verminderte Ist-Leistung der Fertigung zurückzuführen. Der Zugang orientiert sich weiterhin am Plan, während der Ist-Abgang aufgrund der Störungen hinter dem Plan-Abgang zurückfällt. Die Abbildung zeigt ergänzend den Verlauf des Umlaufbestands im simulierten Zeitraum. Es ist zu sehen, dass sich

dieser bei einer Abweichung der Ist- zur Plan-Leistung um 5 % im Simulationszeitraum etwa verdoppelt. Dies führt zu einem mittleren Bestand von 654,7 Std über den gesamten Versuchszeitraum. Die Standardabweichung des Bestands liegt in diesem Versuch bei 174,5 Std.



**Abb. 5-8:** Durchlaufdiagramm Versuch 7 (Auftragsfreigabe nach Termin, Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin)

Im Gegensatz dazu bleibt der Bestand bei einer Conwip-Steuerung (Versuch 8) auch bei Störungen in der Fertigung konstant (Abb. 5-9). Der Zugang ist in diesem Fall an den Abgang gekoppelt, sodass bei verringertem Abgang auch der Zugang zur Fertigung entsprechend gedrosselt wird. Die Streuung des Bestands liegt daher mit einer Standardabweichung von 59,1 Std in diesem Fall deutlich unter der Bestandsstreuung in Versuch 7. Die Streuung ergibt sich aufgrund der Konfiguration der Conwip-Steuerung. Diese gibt immer dann einen Auftrag in die Fertigung frei, sobald ein Auftrag fertiggestellt wird. Maximal dürfen sich 30 Aufträge in der Fertigung befinden. Da die Auftragsstruktur sehr heterogen ist, streut entsprechend auch bei einer Conwip-Steuerung der in Vorgabestunden gemessene Umlaufbestand der Fertigung in geringem Maße.



**Abb. 5-9:** Durchlaufdiagramm Versuch 8 (30 Conwip Karten, Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin)

Insgesamt weisen die vier unterschiedlichen Konfigurationen einige charakteristische Unterschiede sowohl für die auftragspezifischen als auch für die fertigungsspezifischen Kennzahlen auf. Gemeinsam ist allen Konfigurationen die Auftragsannahme und -terminierung. Es lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

1. In allen vier Versuchen ist ein Rückstand durch eine reduzierte Maschinenverfügbarkeit erzeugt worden. Sowohl die Auftragsfreigabe nach Termin als auch die Conwip-Freigabe sind nicht in der Lage, die aus dem Rückstand resultierende Terminabweichung zu vermeiden.
2. Die Conwip-Steuerung ist bei Störungen im Gegensatz zur Auftragsfreigabe nach Termin dazu in der Lage, den Bestand in der Fertigung auf einem konstanten Niveau zu halten. Dies führt zu niedrigeren Fertigungsdurchlaufzeiten, die zudem weniger streuen.
3. Werden die beiden Verfahren der Auftragsfreigabe mit der Reihenfolgebildung nach FIFO kombiniert, verstärkt sich die Streuung der Terminabweichung im Abgang im Vergleich zur Kombination mit der Reihenfolgebildung nach Frühestem Plan-Endtermin leicht.

### 5.4.3 Evaluierung der Kapazitätssteuerung

Dieser Abschnitt dient der Evaluierung der Kapazitätssteuerung. Als für das Wertstromdesign geeignetes Verfahren der Kapazitätssteuerung wurde die Rückstandsregelung identifiziert. Ihr wird kein weiteres Verfahren gegenübergestellt. Es soll daher untersucht werden, wie sich eine durch Störungen beeinflusste Fertigung mit und ohne Rückstandsregelung verhält. Als Störungen dienen ein Rückstand der Fertigung und Terminabweichungen im Zugang. Der Rückstand wird durch eine Reduzierung der Anlagenverfügbarkeit erzeugt (vgl. Abschnitt 5.4.2) und die Terminabweichung im Zugang durch eine normalverteilte Zufallsgröße, mit der die Plan-Starttermine der Aufträge beaufschlagt werden. Tab. 5-8 fasst die Versuche zur Evaluierung der Kapazitätssteuerung zusammen.

Zunächst prüfen die Versuche 8 und 9, wie sich die logistischen Zielgrößen bei Rückstand und einer festen Kombination aus Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung bei Hinzuschalten einer Rückstandsregelung verhalten. Anschließend fügen die Versuche 10 und 11 mit der Terminabweichung im Zugang eine weitere Störgröße hinzu. Auch diese Versuchsreihe vergleicht eine Konfiguration ohne die Rückstandsregelung (Versuch 10) und eine Konfiguration mit der Rückstandsregelung (Versuch 11).

**Tab. 5-8:** Planung der Simulationsversuche zur Evaluierung der Kapazitätssteuerung

Störung	Steuerungskonfiguration			
	Conwip, FPE	Conwip, FPE, RR	AFT, FPE	AFT, FPE, RR
Rückstand	Versuch 8	Versuch 9	-	-
Rückstand, TAZ	-	-	Versuch 10	Versuch 11

- AFT : Auftragsfreigabe nach Termin
- FIFO : Reihenfolgebildung First-In-First-Out
- FPE : Reihenfolgebildung Frühester Plan-Endtermin
- RR : Rückstandsregelung
- TAZ : Terminabweichung im Zugang

Tab. 5-9 fasst die fertigungsspezifischen Kennzahlen dieser Versuchsreihe zusammen. Als markantes Ergebnis von Versuch 8 kann festgehalten werden, dass die Rückstandsregelung in der Lage ist, den auftretenden Rückstand vollständig zu beseitigen. Die Rückstandsregelung arbeitet in dieser Konfiguration zudem sehr präzise. Der mittlere Rückstand beträgt bei Versuch 9 -1 Std. Die mittlere Ist-Leistung beträgt 46,1 Std/BKT und ist damit identisch zur Plan-Leistung der Fertigung. Auch in der zweiten Versuchsreihe (10, 11) kann durch die Rückstandsregelung der Rückstand eliminiert werden. Auch in diesem Fall ist dies durch die Erhöhung der Ist-Leistung erfolgt.

**Tab. 5-9:** Fertigungsspezifische Kennzahlen der Versuche 8 bis 11

Versuch	AQ	LA <sub>m</sub>	L <sub>m</sub>	B <sub>m</sub>	RS <sub>m</sub>	RS <sub>s</sub>
8	37 %	3,2	44,2	669,2	287,4	164,5
9	37 %	3,3	46,1	464,2	-1,0	5,6
10	37 %	3,2	44,2	607,9	249,1	163,5
11	37 %	3,2	46,0	369,9	-7,2	25,4

AQ : Annahmequote [%]  
 LA<sub>m</sub> : Mittlere Leistung in Anzahl Aufträge [1/BKT]  
 L<sub>m</sub> : Mittlere Leistung [Std/BKT]  
 B<sub>m</sub> : Mittlerer Bestand [Std]  
 RS : Rückstand [Std]

In Abb. 5-10 ist die Terminabweichung für den Versuch ohne Rückstandsregelung dargestellt. Diese liegt in diesem Versuch im Mittel bei 5,8 BKT und streut mit einer Standardabweichung von 3,8 BKT relativ stark. Daher stellt die Fertigung auch nur einen sehr geringen Teil der Aufträge termintreu fertig (15 %).

Bei gleicher Störungslage und derselben Konfiguration von Reihenfolgebildung und Auftragsfreigabe schaltet Versuch 9 zusätzlich eine Rückstandsregelung hinzu. Abb. 5-11 zeigt die Terminabweichung für eine aktive Rückstandsregelung. Es können 99 % der Aufträge termintreu fertiggestellt werden und die mittlere Terminabweichung beträgt -0,1 BKT. Auch die Rückstandsschwankungen können mit der hohen Kapazitätsflexibilität aufgefangen werden. Die Standardabweichung der Terminabweichung beträgt 0,3 BKT.

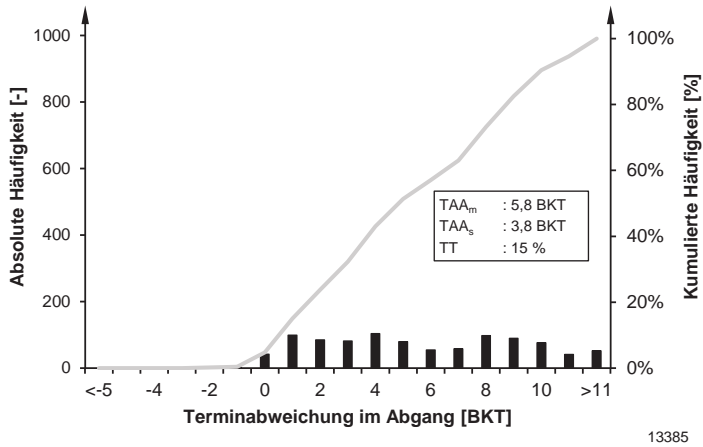


Abb. 5-10: Terminabweichung für Versuch 8 (ohne Rückstandsregelung)

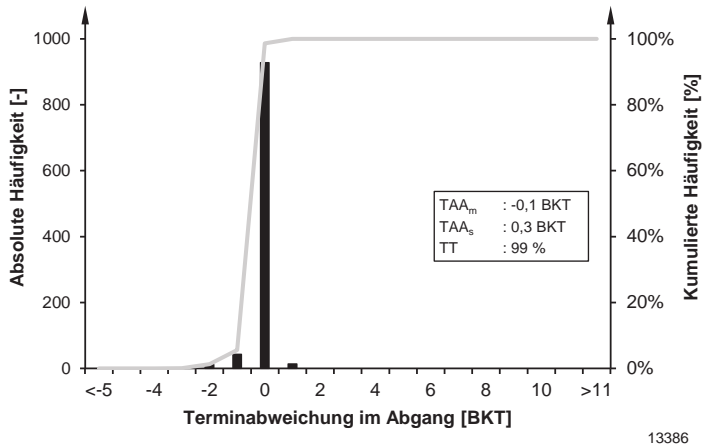
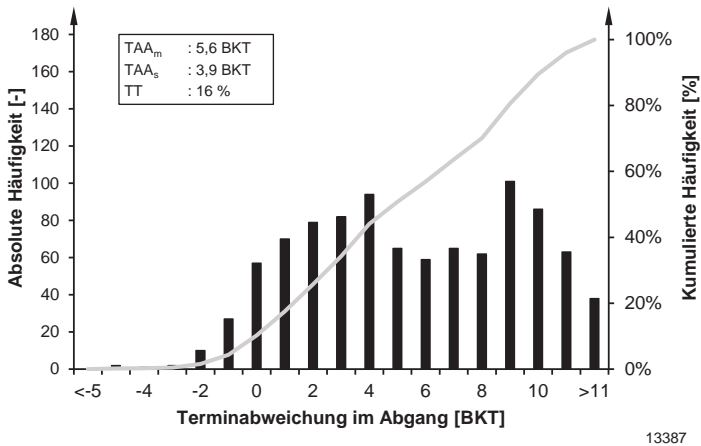


Abb. 5-11: Terminabweichung für Versuch 9 (mit Rückstandsregelung)

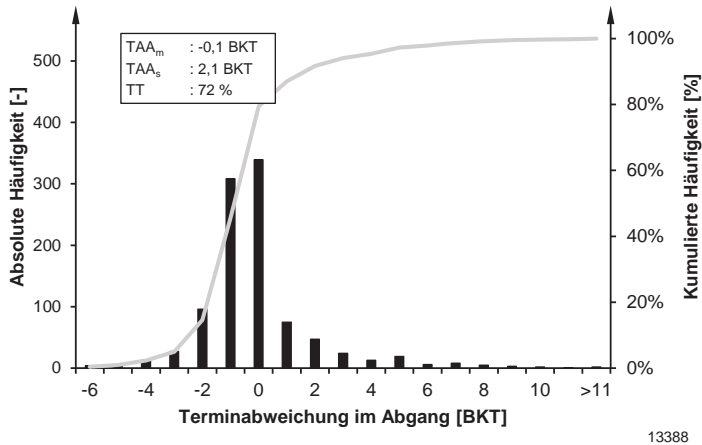
Abb. 5-12 zeigt die Verteilung der Terminabweichung für Versuch 10. Die fehlende Rückstandsregelung führt in diesem Fall zu einer mittleren Terminabweichung von 5,6 BKT, die zudem mit einer Standardabweichung von 3,9 BKT streut.



13387

**Abb. 5-12:** Terminabweichung für Versuch 10 (ohne Rückstandsregelung)

Abb. 5-13 zeigt zum Vergleich die Terminabweichungsverteilung für Versuch 11. In diesem Fall wird die Rückstandsregelung aktiviert, was dazu führt, dass die Aufträge im Mittel eine Terminabweichung von -0,1 BKT aufweisen. Dies führt jedoch nicht zu einer Termintreue nahe der 100 %. Die Termintreue beträgt in diesem Fall 72 %. Dies ist durch die Streuung der Terminabweichung bedingt. Die Standardabweichung der Terminabweichung liegt bei 2,1 BKT. Diese Verteilung der Terminabweichung im Abgang ist der Verteilung aus Versuch 4, indem eine rückstandsfreie Fertigung bei einer Terminabweichung im Zugang untersucht wurde, sehr ähnlich. Die reduzierte Streuung ist daher auf die Reihenfolgebildung nach Frühestem Plan-Endtermin zurückzuführen.



**Abb. 5-13:** Terminabweichung für Versuch 11 (mit Rückstandsregelung)

Bei reinem Rückstand als Störgröße führt die Rückstandsregelung zu sehr guten Ergebnissen, wie die auftragsspezifischen Kennzahlen in Tab. 5-10 für die Versuche 8 und 9 belegen. Sowohl die mittlere Terminabweichung als auch die Streuung der Terminabweichung können nahezu vollständig beseitigt werden.

**Tab. 5-10:** Auftragspezifische Kennzahlen der Versuche 8 bis 11

Versuch	TAZ <sub>m</sub>	TAZ <sub>s</sub>	TAA <sub>m</sub>	TAA <sub>s</sub>	ZDA <sub>m</sub>	TT
8	4,3	3,6	5,8	3,8	9,1	15 %
9	-1,1	1,0	-0,1	0,3	8,7	99 %
10	0,8	3,5	5,6	3,9	12,4	16 %
11	0,7	3,5	-0,1	2,1	6,8	72 %

TAZ : Terminabweichung im Zugang [BKT]

TAA : Terminabweichung im Abgang [BKT]

TT : Termintreue [%]

ZDA : Auftragsdurchlaufzeit [BKT]

Für die Kapazitätssteuerung kann nach Auswertung der Versuche die folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

1. Die sehr hohe Kapazitätsflexibilität befähigt die Rückstandsregelung, Rückstände durch Maschinen- oder Mitarbeiterausfälle sehr zeitnah zu beheben und die mittlere

Verspätung der Aufträge auf null zu setzen. Sie trägt damit unabhängig vom Verfahren der Auftragsfreigabe zu einer hohen Termintreue bei.

2. Versuche 10 und 11 zeigen auf, dass die Rückstandsregelung mit einer Reihenfolgebildung nach Termin kombiniert werden sollte, um sowohl Rückstände als auch Terminabweichungen im Zugang ausregeln zu können.

### 5.5 Gesamtfazit der Evaluierung

Die Versuche zur *Reihenfolgebildung* haben ergeben, dass die Reihenfolgebildung nach Frühestem Plan-Endtermin gegenüber der FIFO-Reihenfolgebildung vorteilhaft ist und zu einer höheren Termintreue der Fertigung führt. Insbesondere Terminabweichungen im Zugang zur Fertigung können durch die Reihenfolgebildung (teilweise) ausgeglichen werden. Dies ist in hohem Maße für Auftragsfertiger relevant.

Da eine Fertigung in der Praxis immer von Störungen betroffen ist, sollte die *Auftragsfreigabe* den Bestand regeln. Störungen bedeuten einen verringerten tatsächlichen Abgang gegenüber dem Plan-Abgang. Dies führt bei einem gleichbleibenden Zugang nach Plan-Termin zu einem erhöhten Umlaufbestand in der Fertigung. Die damit verbundene längere Fertigungsdurchlaufzeit ist mit einigen Nachteilen verknüpft:

1. Rohmaterialien sind früher als notwendig dispositiv vergeben und können nicht mehr für andere dringlichere Aufträge verwendet werden.
2. Lange Durchlaufzeiten können, bspw. durch Korrosion, qualitätsrelevante Merkmale beeinflussen.

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe ist zudem eine Aufgabe, die auch in der Praxis sehr einfach umgesetzt werden kann.

Der Einsatz einer Rückstandsregelung als Verfahren der *Kapazitätssteuerung* wird dringend empfohlen, insbesondere, wenn der Rückstand der Fertigung nicht in der Auftragsannahme und -terminierung berücksichtigt wird. Mit der sehr flexiblen Rückstandsregelung werden durchweg bessere Ergebnisse erzielt. Auch in der Praxis treten Rückstände auf, die dann oftmals in einer unsystematischen Vorgehensweise beseitigt werden. Eine Rückstandsregelung eignet sich als systematisches Verfahren sehr gut, die Termintreue aktiv zu unterstützen.

## 6 Leitlinien und Umsetzung des Wertstromdesigns

Analog zum Wertstromdesign für Lagerfertiger benötigt auch das Wertstromdesign für Auftragsfertiger Leitlinien, mit denen sich der Soll-Zustand schrittweise erstellen lässt. Dieses Kapitel stellt in Abschnitt 6.1 die Leitlinien des neuen Wertstromdesigns vor. Anschließend gibt Abschnitt 6.2 praktische Hinweise zur Umsetzung des Designs. Die Leitlinien werden nicht in allen Unternehmen anwendbar sein. Daher bilden die Grenzbedingungen der Leitlinien in Abschnitt 6.3 den Abschluss dieses Kapitels.

### 6.1 Leitlinien zur Erreichung des Soll-Zustands

Die Leitlinien für ein Wertstromdesign für Auftragsfertiger lassen sich aus den Ergebnissen der Simulationsversuche (Kapitel 5) ableiten. Sie sollen nicht nur eine schrittweise Einführung des Soll-Zustands gewährleisten, sondern darüber hinaus auch das Skizzieren dieses Soll-Zustands unterstützen. Die Skizze des Soll-Zustands ist ein ideales Kommunikationsmittel für die spätere Umsetzung. Das Wertstromdesign besteht aus fünf Leitlinien.

#### 6.1.1 Leitlinie 1: Bestimmen Sie verlässliche Termine für Ihre Aufträge

Zur Steuerung der Fertigung sind aus terminlicher Sicht in der Auftragsfertigung folgende Fragen zu beantworten:

- Wann muss die Bearbeitung des Auftrags starten?
- Wann werden die einzelnen Arbeitsvorgänge durchgeführt?

Die Antworten auf beide Fragen soll die Terminierung der Aufträge liefern. Diese ist meist durch die vorhandene PPS-Software vorgegeben und kann daher in vielen Fällen nur über Systemparameter beeinflusst werden. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die PPS-Software die folgenden Punkte berücksichtigt:

1. Rückwärtsterminierung: Eine Rückwärtsterminierung reduziert den Umlaufbestand und verhindert, dass dringende mit nicht dringenden Aufträgen und Kapazitäten konkurrieren.
2. Terminierung der Arbeitsvorgänge: Anhand der Terminierung von Arbeitsvorgängen kann der Kapazitätsbedarf je Arbeitssystem und Periode besser abgeschätzt werden. Gleichzeitig geben die Plan-Termine eine Orientierung bei der Reihenfolgebildung und ermöglichen es, den Plan-Abgang zu bestimmen, der für die Rückstandsrechnung benötigt wird.

- Übergangszeit bei der Terminierung berücksichtigen: Viele der klassischen ERP-Systeme kennen die Aufteilung der Durchlaufzeit in Übergangs- und Durchführungszeit (vgl. [Weih01, S. 156ff.]). Die Plan-Übergangszeit ist stark abhängig vom Plan-Bestand eines Arbeitssystems und sollte unbedingt an diesen gekoppelt sein (Leitlinie 2).

Start- und Vorgangstermine der Aufträge gehen als Informationen von der PPS an die Auftragsfreigabe. In der Wertstromkarte ist dies durch einen Informationspfeil gekennzeichnet (Abb. 6-1). Da die Vorgangstermine in den Auftragsbegleitpapieren vermerkt sind, ist es nicht notwendig, diese Information separat an die Arbeitssysteme zu senden. Die Plan-Starttermine der Aufträge werden genutzt, um diese entsprechend zu sortieren. Eine sortierte Liste mit freizugebenden Aufträgen verhindert Reihenfolgevertauschungen und eine verfrühte Freigabe. Die Liste wird in der Darstellung des Sollzustands im Prozesskasten „Auftragsfreigabe“ abgebildet.

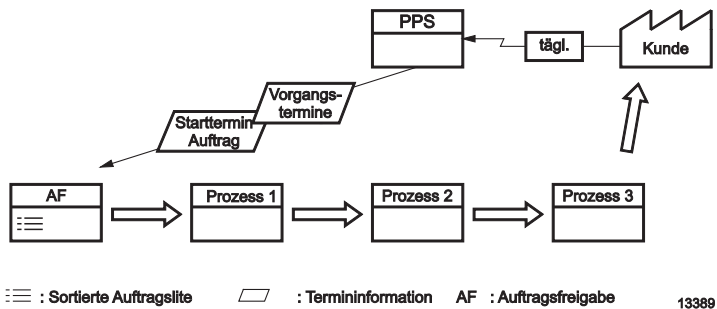


Abb. 6-1: Darstellung der Vorgangstermine in der Wertstromkarte

### 6.1.2 Leitlinie 2: Kontrollieren Sie den Zugang zur Fertigung durch eine Conwip-Steuerung

Eine Freigabe, die sich allein am geplanten Starttermin orientiert, berücksichtigt nicht die aktuelle Situation der Fertigung. Diese ist häufig von Störungen betroffen, die in aller Regel nicht verhindert werden können. Mal fehlt das Rohmaterial, um einen Auftrag zu bearbeiten, mal fällt eine Maschine vorübergehend aus oder Mitarbeiter sind von Krankheit betroffen. Die Fertigung kann jedoch so gesteuert werden, dass die Auswirkungen abgeschwächt oder gänzlich aufgehoben werden. Eine wichtige Maßnahme ist die Bestandsregelung der Fertigung. Eine Kanban-Regelung, wie im konventionellen Wertstromdesign, ist für Auftragsfertiger generell nicht anwendbar. In der Auftragsfertigung kann die Bestandsregelung jedoch durch eine Zugangsbeschränkung zur Fertigung erfolgen.

Ein einfaches und effektives Verfahren zur Regelung des Auftragszugangs ist die Conwip-Steuerung. Wie die Kanban-Steuerung ist die Conwip-Steuerung in der Grundversion ein kartenbasiertes System. Während die Kanban-Systematik zwischen zwei Prozessen Aufträge für ein definiertes Produkt erzeugt, gibt die Conwip-Logik Aufträge für einen gesamten Fertigungsbereich mit allen darin vorkommenden Varianten frei. Dafür wird zunächst ein Plan-Bestand für den Fertigungsbereich festgelegt und es werden dem Plan-Bestand entsprechend viele Conwip-Karten für den Bereich bereitgestellt. Abb. 6-2 erläutert das Prinzip dieser Steuerung für drei Arbeitssysteme mit einem Plan-Bestand von sechs Aufträgen. Wird ein Auftrag fertiggestellt (Schritt 1, Abb. 6-2), geht die diesem Auftrag zugeordnete Karte zurück an die Conwip-Box (Schritt 2, Abb. 6-2) und gibt dort den nächsten Auftrag aus der Liste unabhängig vom Produkt frei.

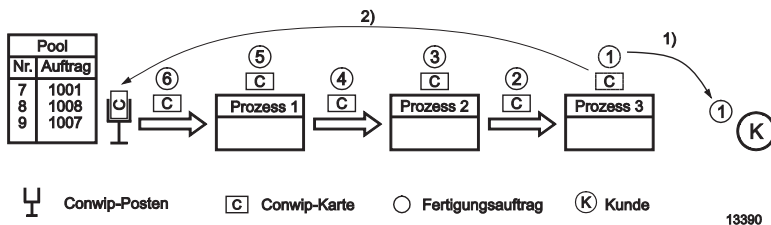


Abb. 6-2: Funktionsweise der Conwip-Steuerung

Mit der Conwip-Steuerung sind einige Symbole verknüpft. Zentrales Element ist die Conwip-Karte, die physisch oder elektronisch ausgestaltet werden kann. Daher existieren in der Symbolik sowohl eine physische als auch eine elektronische Conwip-Karte. Mit der Conwip-Steuerung wird zudem ein Informationsfluss definiert: Die Information der Fertigstellung eines Auftrags gelangt vom letzten Arbeitssystem an die Auftragsfreigabe. In der Darstellung ist dieser Informationsfluss durch einen Pfeil gekennzeichnet. Die übergeordnete Aufgabe Auftragsfreigabe wird als Ordner stilisiert, der mit der Methode beschriftet ist. Abb. 6-3 zeigt die Darstellung der Conwip-Steuerung in der Wertstromkarte und die damit verbundenen Symbole.

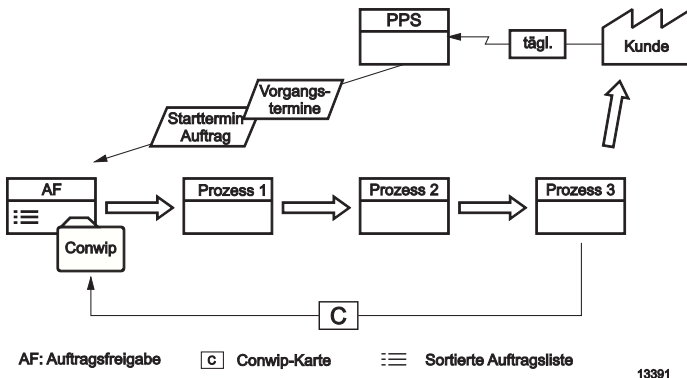


Abb. 6-3: Darstellung und Symbole der Conwip-Steuerung

### 6.1.3 Leitlinie 3: Berücksichtigen Sie die Dringlichkeit eines Auftrags bei der Reihenfolgebildung

In der Lean-Philosophie erfährt die FIFO-Reihenfolgebildung besondere Aufmerksamkeit (vgl. [Like09, S. 145]). Dies ist zum einen auf die einfache Anwendung und zum anderen auf den stabilisierenden Effekt dieser Regel auf die Durchlaufzeit eines Systems zurückzuführen. Dennoch ist die FIFO-Regelung mit Nachteilen verknüpft: Sie ist nicht in der Lage, Plan-Abweichungen zu korrigieren oder heterogene Durchlaufzeiten an den Arbeitssystemen zu realisieren [Lödd16, S. 509]. Dies sind jedoch typischerweise Herausforderungen, denen sich Auftragsfertiger stellen müssen. So müssen häufig verspätet freigegebene Aufträge im Produktionsdurchlauf noch beschleunigt werden, um den versprochenen Liefertermin einzuhalten. Dies geschieht bei einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin automatisch, ohne dass es einer zusätzlichen Koordination, bspw. durch Terminjäger bedarf. Ein Auftragsfertiger sollte daher die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin einer FIFO-Logik vorziehen.

Die Reihenfolgebildung wird wie die Auftragsfreigabe durch eine feste Symblik dargestellt. Vor jedem Prozess existiert eine durch zwei parallele Linien symbolisierte Warteschlange. Aus dieser wird vom Prozess jeweils ein Auftrag entnommen und anschließend bearbeitet. Die Reihenfolgebildung nach Termin wird durch drei priorisierte Auftragsbegleitkärtchen symbolisiert (Abb. 6-4). Taucht dieses Symbol auf, sollen die Mitarbeiter bei der Auswahl eines Auftrags auf die Plan-Termine achten.

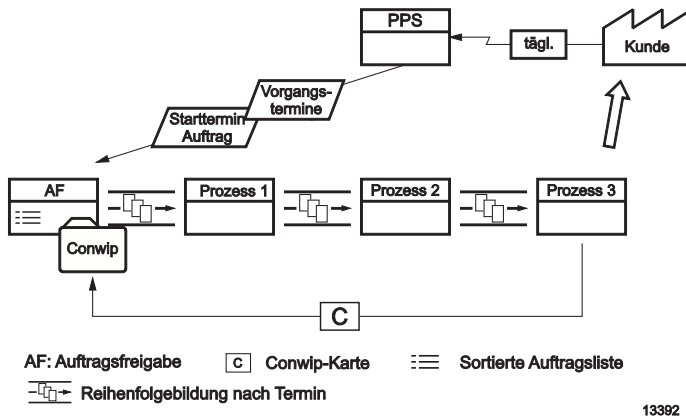


Abb. 6-4: Darstellung Reihenfolgebildung nach Termin

#### 6.1.4 Leitlinie 4: Kommunizieren Sie den Plan-Abgang an alle Arbeitssysteme

Aus der Termin- und Kapazitätsplanung resultieren neben den Plan-Terminen der Aufträge und Vorgänge auch tagesgenaue Plan-Abgänge für die Fertigung und die Arbeitssysteme. Der Plan-Abgang entspricht der Summe der Vorgabestunden, die an diesem Tag abgearbeitet werden müssen. Ein wichtiger Schritt in Richtung termintreuer Fertigung ist neben der Wahl des dringlichsten Auftrags auch die Bearbeitung des täglich vorgesehenen Arbeitsvolumens. Weicht der Ist-Abgang zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Plan-Abgang ab, entsteht ein Rückstand. Ein positiver Rückstand heißt, dass die Fertigung oder das Arbeitssystem nicht den vorgesehenen Abgang erreicht hat. Aufträge, die aus diesem Grund das System später als geplant verlassen, besitzen eine positive Terminabweichung, was je nach Höhe der Termintoleranz zu einer verringerten Termintreue führt [Kuyu13, S. 26].

Dargestellt wird der Plan-Abgang in der Wertstromkarte als Informationsfluss von der Produktionsplanung und -steuerung an die einzelnen Arbeitssysteme. Abb. 6-5 zeigt die mit dem Plan-Abgang verknüpfte Symbolik. Es fällt auf, dass dieses Vorgehen im Widerspruch zum konventionellen Wertstromdesign steht, das die Produktionsplanung nur an einer Stelle des Auftragsdurchlaufs ansetzt und nicht an allen Arbeitssystemen. An dieser Stelle sei ein kurzer Hinweis auf die Praxis des Lean Managements gegeben: Für Unternehmen, die erfolgreich eine Rückstandsregelung anwenden, ist die Kommunikation des Plan-Abgangs an die Arbeitssysteme, bspw. in Form einer Stückzahlenmanagementgrafik, Teil der täglichen Produktionssteuerung (vgl. [Take13, S. 113]). Auch die konventionelle Wertstrommethode sollte dies bei der Gestaltung der Informationsflüsse berücksichtigen.

Die Informationsversorgung wird in der Wertstromkarte durch Informationspfeile von der PPS an die Arbeitssysteme gekennzeichnet (Abb. 6-5).

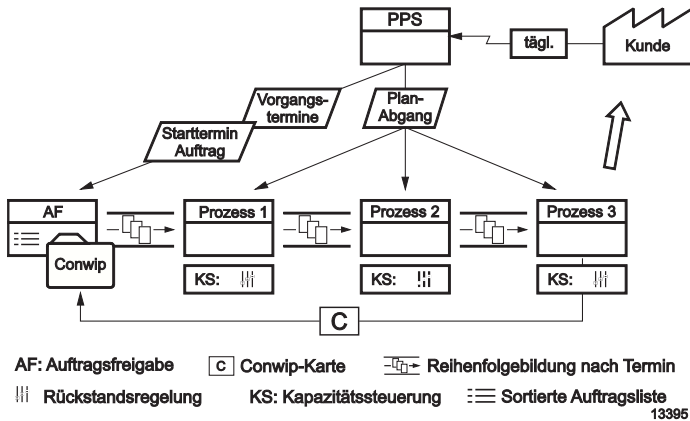


Abb. 6-5: Informationsfluss für den Plan-Abgang

### 6.1.5 Leitlinie 5: Beseitigen Sie Rückstände an den Arbeitssystemen durch eine systematische Rückstandsregelung

Eine Rückstandsregelung sorgt dafür, dass die Fertigung durch kurzfristige Kapazitätsanpassungen den geplanten Abgang trotz Störungen erreicht [Lödd16, S. 551]. Sie ist somit ein wichtiges Werkzeug für die termintreue Fertigung. In vielen Fällen wenden Unternehmen die grundsätzliche Idee einer Rückstandsregelung bereits an, ohne auf ein systematisches Vorgehen zurückzugreifen. Die Kapazitätssteuerung ist in diesen Fällen oft an die Meisterebene delegiert [Krob13, S. 36]. Diese sind in ihrem Bereich verantwortlich für Überstunden oder zusätzliche Wochenendschichten. Da der Rückstand jedoch häufig nicht gemessen wird, erfolgt die Reaktion in Form von Kapazitätsanpassungen oft erst bei einem sehr offensichtlichen Rückstand. Damit sind im Wesentlichen folgende Nachteile verknüpft:

- Viele Unternehmen passen die Kapazitäten zu spät an, sodass aus dem kumulierten Rückstand bereits erhebliche Terminabweichungen resultieren.
- Der Koordinationsaufwand steigt, da die Kapazitätsanpassungen den Charakter von Sondermaßnahmen bekommen und nicht Teil einer täglichen Aufgabenroutine sind.
- Die Bereiche agieren unkoordiniert und treffen die Entscheidungen über Kapazitätsanpassungen nach bereichsindividuellen Kriterien.

Eine Rückstandsregelung ist umso effektiver, je kurzfristiger sie eingreifen kann. Takeda empfiehlt daher, den Rückstand stündlich zu messen, um den Produktionsplan für einen Tag auch an diesem zu erfüllen [Take13, S. 111f.]. Durch die Gegenüberstellung von Plan- und Ist-Abgang lässt sich der Rückstand eines Arbeitssystems oder einer Fertigung ermitteln. Über- oder unterschreitet der Rückstand einen zuvor definierten Grenzwert, werden Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung bzw. -reduzierung eingeleitet, die mit Ablauf der Reaktionszeit durchgeföhrt werden (Abb. 6-6). Es sind daher Grenzwerte für den Rückstand und Maßnahmen zu Kapazitätserhöhungen bzw. -verringerungen mit ihren entsprechenden Reaktionszeiten zu bestimmen.

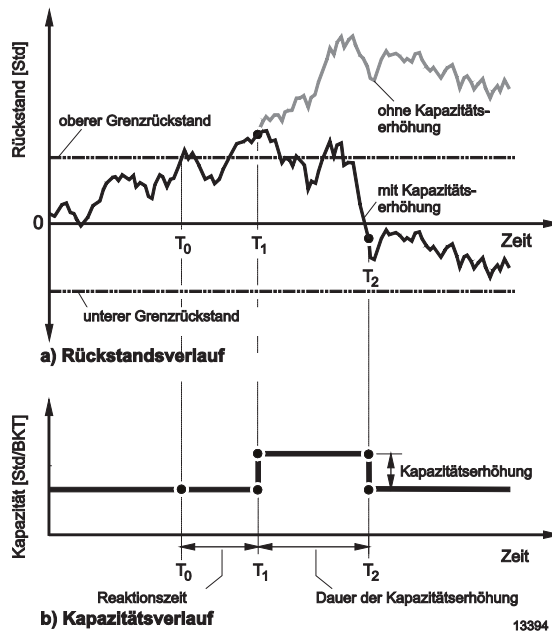


Abb. 6-6: Prinzip der Rückstandsregelung i.A. [Lödd16, S. 553]

Ein stilisierter Regler symbolisiert die Rückstandsregelung in der Wertstromkarte des Soll-Zustands. Der Regler wird jeweils auf der rechten Seite in einen separaten Kasten unterhalb des Prozesskastens eingetragen (Abb. 6-7).

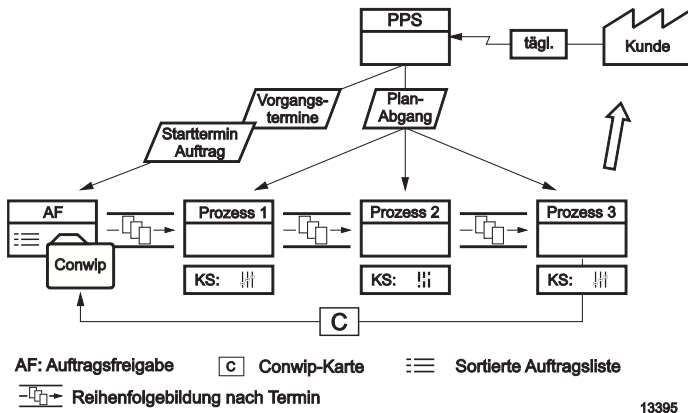


Abb. 6-7: Darstellung Rückstandsregelung in der Wertstromkarte

## 6.2 Umsetzung des Soll-Zustands

Mit dem Wertstromdesign existiert ein Soll-Konzept für die Gestaltung der Fertigungssteuerung in einem ausgewählten Unternehmensbereich. Dieser Abschnitt behandelt die Umsetzung der Leitlinien in der Praxis. Es können drei Arbeitspakete identifiziert werden, für die die zunächst Verantwortlichkeiten und der zeitlichen Rahmen festgelegt werden sollten:

- Conwip-Freigabe
- Reihenfolgebildung nach Termin
- Rückstandsregelung

Die Teilprojekte sind so angelegt, dass Unternehmen sie entweder parallel oder nacheinander durchführen können. Wie die Arbeitspakete abgearbeitet werden, hängt von der Größe des Projektteams ab. Es lohnt sich jedoch häufig, das Wertstromdesign in der genannten Reihenfolge einzuführen. Die Conwip-Steuerung begrenzt den Umlaufbestand, verkürzt damit die Durchlaufzeit von Aufträgen und ist relativ schnell umsetzbar. Die Bestandsregelung erleichtert zudem die Reihenfolgebildung. Die Rückstandsregelung wird in den meisten Unternehmen den aufwändigsten Teil der Umsetzung darstellen und sollte möglichst auf einer funktionierenden Bestandsregelung und Reihenfolgebildung aufbauen.

### Conwip-Freigabe

Die Conwip-Freigabe umfasst den Informationsfluss zwischen der PPS, dem Auftragspool und der Fertigung. Um die Conwip-Steuerung gewinnbringend einzuführen, ist

es notwendig, die Anzahl der Karten je Arbeitssystem zu bestimmen. Über Littles Gesetz gilt folgende Beziehung ([Lödd16, S. 381]):

$$ZDL_{m, Plan} = \frac{AnzConwip}{LA_{m, Plan}} \quad 6-1$$

$ZDL_{m, Plan}$  : mittlere Plan-Durchlaufzeit des Arbeitssystems [BKT]

$AnzConwip$  : Anzahl Conwip-Karten für das Arbeitssystem [-]

$LA_{m, Plan}$  : mittlere Plan-Leistung des Arbeitssystems [1/BKT]

Für das Projektteam „Conwip-Freigabe“ ist die zentrale Aufgabe, Plan-Bestände in Form von Conwip-Karten für alle Arbeitssysteme zu bestimmen. Diese können entweder von internen Prozessexperten festgelegt oder modellbasiert mit Hilfe von Produktionskennlinien ermittelt werden.

Bei ersterem Vorgehen legt das Unternehmen für jedes Arbeitssystem einen ausreichenden Plan-Bestand (in Anzahl Karten) fest und bestimmt auf diese Weise die Plan-Durchlaufzeit des Systems. Die Kartenanzahl kann anschließend reduziert und eventuelle Auslastungsverluste gemessen werden. Ergeben sich noch keine Auslastungsverluste, kann die Kartenanzahl weiter reduziert werden. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung etabliert werden kann und dass die Produktionsmitarbeiter direkt in den Verbesserungsprozess involviert sind. Nachteilig wirkt sich der relativ lange Etablierungsprozess dieser „Trial and Error“-Methodik aus.

Um den iterativen Prozess zu umgehen, bietet sich ein modellbasiertes Vorgehen an. Die Erstellung von Produktionskennlinien sei an dieser Stelle nicht näher erläutert. Nyhuis beschreibt die Theorie zu den Produktionskennlinien sehr ausführlich (vgl [Nyhu12]). Die Produktionskennlinien bilden die logistischen Zielgrößen – u.a. Durchlaufzeit und Leistung – in Abhängigkeit des Bestands an einem Arbeitssystem ab (Abb. 6-8).

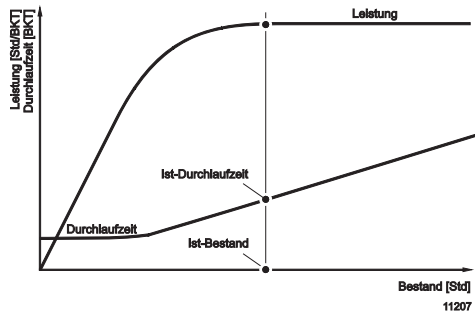


Abb. 6-8: Verlauf von Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinien i.A. [Nyu12, S. 84]

Zur Bestimmung der Anzahl der Conwip-Karten sind dann vier Schritte notwendig [Lödd16, S. 383]:

1. Berechnung der Produktionskennlinien für jedes Arbeitssystem
2. Logistische Positionierung zur Bestimmung eines Plan-Bestands
3. Umrechnung des Plan-Bestands in die Einheit Anzahl Aufträge
4. Aufsummierung der Plan-Bestände aller Arbeitssysteme des Bereichs

Ist die Anzahl der Karten bestimmt, sollten Hilfsmittel für die praktische Umsetzung der Conwip-Freigabe bereitgestellt werden. Als Hilfsmittel eignen sich für dieses Verfahren physische Conwip-Karten und eine übersichtliche Auftragsliste (Abb. 6-9).

Nr.	Auftrag	Startdatum
1	1003	01.12.
2	1004	01.12.
3	1005	04.12.
4	1006	05.12.
5	1007	05.12.
...	...	...

a) Auftragsliste

**Conwip-Karte**

**Mechanische Fertigung**

**Karte 4 / 30**

b) Conwip-Karte

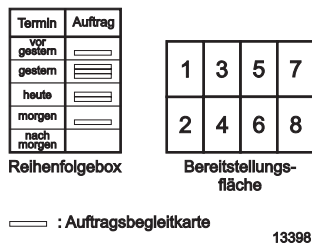
13397

Abb. 6-9: Hilfsmittel zur Umsetzung der Conwip-Steuerung

Beide Hilfsmittel können sehr schnell erstellt werden. Conwip-Karten gelten für einen definierten Bereich und werden jeweils einem freizugebenden Auftrag zugeordnet. Die Auftragsliste enthält die nach Starttermin sortierten Aufträge. So können Reihenfolgevertauschungen von Aufträgen im Zugang vermieden werden. Diese Liste kann zudem mit einem Vorgriffshorizont versehen werden, um Aufträge vorzeitig freigeben und Auslastungsverluste vermeiden zu können.

### Reihenfolgebildung nach Termin

Die Reihenfolgebildung lässt sich in einer Fertigung theoretisch sehr leicht vorgeben. In der Praxis scheitert die Reihenfolgebildung häufig an einer konsequenten Umsetzung. Zur Unterstützung der Reihenfolgebildung nach Termin existieren Hilfsmittel, die ohne großen technologischen Aufwand eingeführt werden können. Zu den Hilfsmitteln gehören die Reihenfolgebox und markierte Bereitstellungsflächen an den Arbeitssystemen. In die Reihenfolgeboxen werden die Auftragsbegleitkarten entsprechend ihrer Plan-Termine einsortiert. Die gekennzeichneten Bereitstellungsflächen nehmen Aufträge nach der Fertigstellung am vorgelagerten System auf (Abb. 6-10). Der Mitarbeiter des Arbeitssystems kann nun den Auftrag mit der höchsten Priorität der Reihenfolgebox entnehmen und sich das dazugehörige Material von der Bereitstellungsfläche holen. Gut zugängliche und übersichtliche Bereitstellungsflächen erhöhen die Bereitschaft, auch den dringlichsten Auftrag zu bearbeiten [Lödd16, S. 526].



**Abb. 6-10:** Hilfsmittel zur Reihenfolgebildung an Arbeitssystemen [Lödd16, S. 526]

Die Reihenfolgebox besitzt in diesem Fall die fünf Dringlichkeitskategorien „vor gestern“, „gestern“, „heute“, „morgen“ und „nach morgen“. Die Auftragsbegleitkarten werden entsprechend ihrer Termine den Kategorien zugeordnet. Auf diese Weise erlangt der Produktionsmitarbeiter einen schnellen Überblick über die Prioritäten der vorliegenden Aufträge. Da keine absoluten Termine verwendet werden, ist es notwendig, die Reihenfolgebox zu Tagesbeginn neu zu sortieren. Der tägliche Umgang mit den Plan-Terminen erhöht zusätzlich das Bewusstsein für deren Einhaltung.

### Rückstandsregelung

Die Rückstandsregelung ist ein in der Theorie einfaches Verfahren, in ihrer praktischen Umsetzung jedoch häufig kompliziert. Voraussetzung für die Anwendung ist eine ausreichende Kapazitätsflexibilität der Fertigung. Diese beschreibt das Vermögen, die Kapazitäten schnell und im großen Ausmaß zu verändern [Lödd16, S. 537]. Der Kapazitätsflexibilität sind in der betrieblichen Praxis häufig organisatorische Grenzen gesetzt, sodass eine sofortige Kapazitätsanpassung nicht möglich ist. Eine Kapazitätsanpassung ist daher fast

immer mit einem Vorlauf verbunden und nur in definierten Höhen möglich. Für eine konsequente und erfolgreiche Umsetzung einer Rückstandsregelung sind drei Faktoren entscheidend:

1. Sicherstellung einer ausreichenden Kapazitätsflexibilität
2. Messung des Rückstands und Umrechnung in eine Terminabweichung
3. Reaktion des Systems bei Rückstand

Die Kapazitätsflexibilität eines Arbeitssystems beschreiben Breithaupt und Wiendahl mit Kapazitätshüllkurven [Brei01, S. 76f.]. Kapazitätshüllkurven geben an, mit welcher Reaktionszeit Kapazitätserhöhungen oder -verringerungen möglich sind. Abb. 6-11 zeigt ein Beispielsystem, das mit einem Vorlauf von zwei Tagen die Kapazität um zwei Stunden und mit einem Vorlauf von 10 Tagen um acht Stunden erhöhen kann.

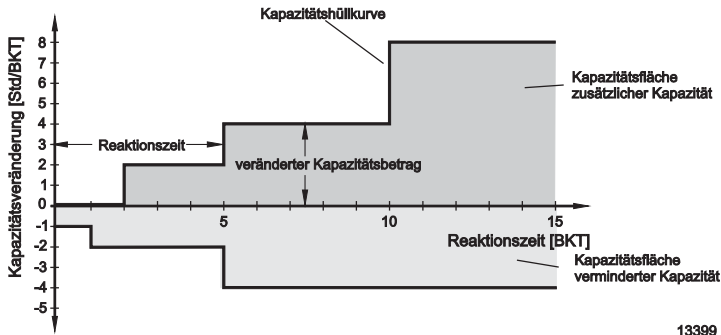


Abb. 6-11: Beispielhafte Kapazitätshüllkurven für ein Arbeitssystem [Brei01, S. 77]

Gerade kurzfristige Kapazitätsbedarfe, die bspw. aufgrund von krankheitsbedingtem Personalausfall entstehen, bereiten Unternehmen größere Schwierigkeiten, da für diesen Fall schnelle Reaktionen erforderlich sind. Ein geeignetes Mittel ist hier die Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern.

Im zweiten Schritt wird der Rückstand bestimmt und in eine Terminabweichung umgerechnet. Für den Rückstand gilt der folgende Zusammenhang [Pete96, S. 65]:

$$RS(t) = AB_{plan}(t) - AB_{ist}(t) \tag{6-2}$$

- $RS(t)$  : Rückstand [Std]
- $AP_{Plan}(t)$  : Plan-Abgang [Std]
- $AP_{Ist}(t)$  : Ist-Abgang [Std]

Der Rückstand kann in vielen Fällen über das Betriebsdatenerfassungssystem ermittelt werden. Wenn die Fertigungsmitarbeiter die Aufträge manuell zurückmelden, bspw. über einen Barcode-Scanner, ist darauf zu achten, dass dies direkt nach der Fertigstellung des Auftrags bzw. Vorgangs geschieht und es nicht zu Sammelrückmeldungen kommt, die die Rückstandsmessungen verzerren. Sinnvoll ist es vielmehr, den Rückstand kontinuierlich zu messen und auf Monitoren direkt am Arbeitssystem als kumulierte Werte anzuzeigen. Abb. 6-12 zeigt tagesgenau den geplanten und tatsächlichen Abgang in Vorgabestunden an. Nach Schichtende an Tag 5 beträgt der kumulierte Rückstand 7,7 Stunden.

Tag	Plan-Abgang	Ist-Abgang	kumulierter Rückstand
1	8,0 Std	8,0 Std	0
2	7,2 Std	6,4 Std	0,8 Std
3	7,4 Std	7,4 Std	0,8 Std
4	6,8 Std	4,3 Std	3,3 Std
5	7,6 Std	3,2 Std	7,7 Std
6	8,0 Std	-	-

13400

Abb. 6-12: Monitor zur Darstellung des Plan- und Ist-Abgangs an einem Arbeitssystem

Die Umwandlung in die Terminabweichung erfolgt über Formel 2-11 (vgl. Abschn. 2.2.3):

$$TAA_{m,RS} = \frac{RS_m}{L_m} \quad 6-3$$

- $TAA_{m,RS}$  : mittlere Abgangsterminabweichung aus Rückstand [BKT]  
 $RS_m$  : Mittlerer Rückstand [Std]  
 $L_m$  : mittlere Leistung [Std/BKT]

Der dritte Schritt beinhaltet eine systematische und formalisierte Vorgehensweise bei einem auftretenden Rückstand. Die Rückstandsregelung sollte nicht auf Zuruf ausgelöst werden, sondern immer dann, wenn es aus terminlicher Sicht notwendig ist. Ein gutes Hilfsmittel sind Entscheidungstabellen (Tab. 6-1), in denen festgehalten wird, welche Maßnahmen bei Terminabweichung greifen. Danach erhöht das Unternehmen die Kapazität bei einem Rückstand von 1-4 Stunden um eine Überstunde pro Tag, bis der Rückstand abgebaut ist.

**Tab. 6-1:** Entscheidungstabelle für i.A. [Brei02, S. 27; Lödd16, S. 566]

Rückstand [Std]	Terminabweichung [BKT]	Abzuleitende Maßnahmen	Dauer der Änderung
$0 < RS \leq 4$	$TAA \leq 0,5$	1 Überstunde pro BKT	bis RS = 0
$5 < RS \leq 10$	$0,8 < TAA \leq 1,3$	1 Wochenendschicht pro Woche	einmalig
$11 < RS \leq 16$	$1,4 < TAA \leq 2,0$	1 Wochenendschicht pro Woche + 1 Überstunde pro BKT	Überstunden:
$9 < RS \leq 24$	$2,2 < TAA \leq 3,0$	1 Wochenendschicht pro Woche + 2 Überstunde pro BKT	Überstunden:
$RS > 24$	$>3$	2 Wochenendschichten pro Woche	bis RS = 0

### 6.3 Grenzbedingungen des Wertstromdesigns

Eine Anforderung an das Wertstromdesign ist zwar die Allgemeingültigkeit der verwendeten Methoden. Diese können jedoch nicht in allen Fällen unproblematisch angewendet werden. Dieser Abschnitt formuliert daher für die eingesetzten Methoden *Conwip-Steuerung*, *Reihenfolgebildung nach Termin* und *Rückstandsregelung* Bedingungen, unter denen eine Anwendung nicht mehr sinnvoll ist.

#### 6.3.1 Grenzbedingung der Conwip-Steuerung

Die Conwip-Steuerung ist in ihrer Anwendung sehr flexibel. Dies betrifft zum einen die Komplexität der Fertigungsumgebung und zum anderen die Ausgestaltung des Verfahrens selber. Im Gegensatz zu einer Kanban-Steuerung ist die Conwip-Steuerung nicht an eine bestimmte Materialnummer geknüpft, sondern fertigungsbereichsspezifisch. Dieser Fertigungsbereich kann, wie ursprünglich von Hopp und Spearman angedacht, aus einer Fertigungslinie bestehen [Hopp08, S. 364]. Das Verfahren ist jedoch so robust, dass es sich in der industriellen Praxis auch in Werkstätten bewährt hat (vgl. [Koch15, S. 38]).

Trotz der grundsätzlich robusten Gestalt des Verfahrens und seiner vielfältigen Einsatzgebiete existieren Grenzen für den Einsatz. Drei wesentlichen Faktoren, die gegen einen Einsatz der Conwip-Steuerung sprechen, sind [Lödd08, S. 337f.]:

- Unterlast der Fertigung
- Konstanter Engpass vorhanden
- Feinterminierung in die begrenzte Kapazität

### **Unterlast der Fertigung**

Die Auftragsfreigabe nach Conwip ist auf eine Liste mit freizugebenden Aufträgen angewiesen. Je höher dieser Pool-Bestand ist, desto größer ist das Vermögen der Conwip-Steuerung, den Umlaufbestand in der Fertigung zu regeln. Die Conwip-Steuerung ist somit auf eine hohe Auslastung der Fertigung angewiesen. Bei einer Unterauslastung der Fertigung würde das Verfahren Aufträge aus dem Pool-Bestand noch vor deren Plan-Starttermin freigeben, um das festgelegte Bestandsniveau zu halten. Dies erhöht unnötigerweise den Bestand und führt zudem zu einer frühzeitigen Fertigstellung der Aufträge.

### **Konstanter Engpass vorhanden**

Liegt ein konstanter Engpass im untersuchten Fertigungsbereich vor, führt eine Engpasssteuerung zu einer besseren logistischen Zielerreichung, da bei gleichem Bestandsniveau die Engpasssteuerung durch eine bessere Auslastung des Durchsatzengpasses zu einem höheren Abgang der Fertigung führt. Es sollte in diesem Fall eine Engpasssteuerung Anwendung finden, die ähnlich einfach zu gestalten ist wie die Conwip-Steuerung. Der kartenbasierte Regelkreis greift in diesem Fall jedoch nur für den Fertigungsbereich bis zum Engpass. Nach dem Durchlaufen des Engpasssystems werden die Karten für neue Aufträge wieder freigegeben.

### **Feinterminierung der Fertigungsaufträge**

Die dritte Grenzbedingung ist an die Terminierung der Fertigungsaufträge geknüpft. Werden die Aufträge mit einer Feinterminierung eingeplant, ist es theoretisch möglich, dass der so festgelegte Plan-Bestand über der Bestandsgrenze der Conwip-Steuerung liegt und diese die Vorgaben der Produktionsplanung nicht umsetzen kann [Lödd08, S. 338].

### **6.3.2 Grenzbedingungen für die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin**

Die Simulationsuntersuchungen haben gezeigt, dass für eine Reihe von äußeren Störeinflüssen die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin eine deutlich höhere Termintreue erzielen kann als eine FIFO-Reihenfolgebildung. Der Einfluss der Reihenfolgebildung ist im Besonderen bei einer hohen Produktvarianz mit komplexen Materialflüssen sowie bei hohen Beständen groß. Dennoch ist die Einführung einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin nicht in allen Unternehmen direkt sinnvoll. Folgende Bedingungen können die Einführung erschweren:

- Technologisch-organisatorische Restriktionen
- Materialflussrestriktionen

### **Technologisch-organisatorische Restriktionen**

In industriellen Produktionsprozessen kommt es häufiger vor, dass die Rüstzeiten für einen Auftragswechsel an Arbeitssystemen von der Auftragsreihenfolge abhängig sind. Der Wechsel von Auftrag A zu Auftrag B kann viel zeitaufwändiger sein als ein Wechsel von Auftrag A zu Auftrag C. Um die Leistung des Arbeitssystems zu erhöhen, kann nun anstelle des terminlich dringlicheren Auftrags B der Auftrag C vorgezogen werden. Aufträge mit einer ähnlichen Rüstkonfiguration können zu Rüstfamilien zusammengefasst werden. Die Unternehmen bewegen sich daher in einem Zielkonflikt aus Leistungsmaximierung und einer hohen Termintreue. Ist der Rüstaufwand innerhalb einer Rüstfamilie deutlich geringer als zwischen zwei Rüstfamilien, kann es sich daher lohnen, von der zuvor geplanten Reihenfolge abzuweichen und eine rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung einzuführen.

### **Materialflussrestriktionen**

Eine Auftragsfertigung kann auch im Fließprinzip organisiert sein, wie bspw. eine teilautomatisierte Montagelinie in der Elektronikfertigung. In der Fließfertigung werden die Aufträge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Arbeitssystemen in der Regel nach der FIFO-Logik sortiert. Häufig werden zudem Durchlaufregale als Lagerfläche für Fertigungsaufträge eingesetzt, um die FIFO-Reihenfolgebildung am Arbeitssystem zu erzwingen. Bietet das Unternehmen nicht explizit flexible Lieferzeiten an, kann der Aufwand für die Umstellung den Nutzen einer terminorientierten Reihenfolgebildung in diesem Fall übersteigen.

#### **6.3.3 Grenzbedingung für die Rückstandsregelung**

Die Rückstandsregelung ist ein sehr sinnvolles Instrument, um durch kurzfristige Kapazitätsanpassungen die geplanten Abgänge trotz Maschinen- oder Mitarbeiterausfällen zu erreichen. Um eine wirksame Rückstandsregelung zu installieren, sind daher zunächst die Rückstände einer Fertigung bzw. der einzelnen Arbeitssysteme zu messen und anschließend geeignete Methoden zur Kapazitätserhöhung bzw.-reduzierung zu treffen. Die Rückstandsregelung setzt voraus, dass in einem gewissen Rahmen eine Kapazitätsflexibilität im Unternehmen vorliegt. Arbeitet ein Unternehmen bspw. bereits an sieben Tagen im Dreischichtbetrieb, ist es nicht in der Lage, Überstunden oder gar Zusatzschichten als Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung einzuführen. In diesem Fall kann der Rückstand kurzfristig nur über eine geeignete Auftragsannahme reduziert werden, indem diese im Kapazitätsabgleich den Rückstand der Fertigung einbezieht. Mittel- bis langfristig sollten dann entsprechende Kapazitätsreserven geschaffen werden, um mehr Kundenanfragen annehmen zu können.

## 7 Evaluierung in der Praxis

Dieses Kapitel beschreibt zwei Anwendungsbeispiele, in denen die Wertstrommethode für Auftragsfertiger in der industriellen Praxis erprobt wurde. Dafür formuliert Abschnitt 7.1 zunächst die Ziele der Evaluierung und stellt die beiden Anwendungsfälle vor. In beiden Beispielen findet zudem ein Vergleich mit Rückmeldedaten statt, um das Bewusstsein für die statistische Unschärfe der Wertstrommethode zu fördern. Abschnitt 7.2 erläutert das Vorgehen für einen Vergleich mit Rückmeldedaten. Die Abschnitte 7.3 und 7.4 sind den beiden Fallstudien gewidmet.

### 7.1 Ziele und Überblick

Die Anwendung der Gesamtmethodik im industriellen Umfeld dient dazu, die Praxistauglichkeit der entwickelten Wertstrommethode zu untersuchen. Die Beurteilung der Tauglichkeit stützt sich dabei auf die folgenden Fragestellungen:

- Ist es möglich, das Verfahren im laufenden Betrieb durchzuführen, ohne die Produktionsmitarbeiter einzuschränken?
- Wie hoch ist der Aufwand für die Analysephase? Lässt sich die Analyse innerhalb eines Tages durchführen?
- Lassen sich die logistischen Zielgrößen mit ihren Einflussgrößen im laufenden Betrieb erfassen?
- Gelingt es, Handlungsfelder für die Fertigungssteuerung zu identifizieren?
- Repräsentieren die erhobenen Kennzahlen einen typischen Zustand des untersuchten Unternehmens?
- Können die Elemente des Wertstromdesigns auch in komplexen Fertigungen angewendet werden?
- Sind Wertstromanalyse und -design für den Methodenanwender nachvollziehbar?
- Welche Schwierigkeiten treten bei der Durchführung der Wertstrommethode auf?

Die Methode soll demnach zur Praxiserprobung in verschiedenen Formen der für Auftragsfertiger typischen Einzel- und Kleineserienproduktion evaluiert werden. Dazu werden die Fertigungen zweier Unternehmen untersucht. Fallstudie 1 untersucht die Schleiferei eines Herstellers von Präzisionsteilen, Fallstudie 2 die mechanische Fertigung eines Herstellers von Industriegetrieben. Tab. 7-1 zeigt Merkmale beider Unternehmen.

**Tab. 7-1:** Übersicht über die Anwendungsbeispiele

<b>Merkmal</b>	<b>Unternehmen 1</b>	<b>Unternehmen 2</b>
Fertigungsprinzip	Werkstattprinzip	Werkstattprinzip
Fertigungsart	Schleiferei	Mechanische Fertigung
Anzahl der Arbeitssysteme	11	27
Anzahl der Arbeitsplätze	50	42
Anzahl der Mitarbeiter	18	32

## 7.2 Vergleich mit Rückmeldedaten

Die Wertstrommethode kann in der Analyse nur eine Momentaufnahme der Fertigung abbilden, sie wird jedoch in der Regel als Ausgangspunkt für langfristige Verbesserungsinitiativen genutzt. Da die Wertstromanalyse einen (zufälligen) Zeitpunkt in der Fertigung abbildet, besteht die Gefahr, dass sie keinen typischen Zustand der Fertigung repräsentiert. Die Daten der Wertstromanalyse unterliegen keiner grundsätzlichen Fehlinterpretation, da ein tatsächlicher Zustand erfasst wird. Logistische Zielgrößen können jedoch über einen längeren Betrachtungszeitraum in der Praxis stark schwanken. Dieser Abschnitt stellt ein Vorgehen vor, das die Ergebnisse der Wertstromanalyse mit Daten vergleicht, die über einen längeren Zeitraum erhoben wurden. Dafür werden Evaluationskriterien und notwendige Rückmeldedaten definiert, anschließend wird ein standardisierter Vergleich vorgeschlagen.

### 7.2.1 Evaluationskriterien

Evaluationskriterien für den Vergleich der Ergebnisse einer Wertstromanalyse mit den für einen längeren Zeitraum erfassten Rückmeldedaten sind die logistischen Ziel- und Einflussgrößen. Folgende Größen sollen evaluiert werden.

- Bestand in Anzahl Aufträgen
- Terminabweichung im Abgang
- Reihenfolgedisziplin

Der Bestand in Anzahl Aufträge lässt sich sowohl in der Wertstromanalyse als auch aus Rückmeldedaten leicht ermitteln und kann entsprechend verglichen werden. Es bietet sich ein Vergleich auf Ebene des Fertigungsbereichs an, da für diesen Bestand angenommen wird, dass er geringeren Schwankungen unterliegt als die Bestände der einzelnen Arbeitssysteme.

Die Terminabweichung im Abgang wird in der Wertstromanalyse an allen Arbeitssystemen anhand der verbleibenden Durchlaufzeiten der vorliegenden Aufträge abgeschätzt. Existiert ein Arbeitssystem, das alle Aufträge im letzten Arbeitsgang durchlaufen, wie bspw. ein Kontrollarbeitssystem oder der Versand, lassen sich Rückschlüsse auf die mittlere Terminabweichung der Aufträge ziehen. Aus den Rückmeldedaten lässt sich die Terminabweichung im Abgang für jeden Auftrag bestimmen.

Die Reihenfolgedisziplin wird in der Wertstromanalyse mit Hilfe der in Bearbeitung befindlichen Aufträge abgeschätzt. Die Reihenfolgedisziplin einer Fertigung lässt sich auch anhand von Rückmeldedaten der Fertigung bestimmen, indem für jeden Arbeitsvorgang bestimmt wird, ob der ausgewählte Auftrag die höchste Priorität aller vorliegenden Aufträge besaß. Aus Terminalsicht ist der Auftrag am dringlichsten, dessen Arbeitsvorgang das niedrigste Plan-Bearbeitungsende hat.

### 7.2.2 Notwendige Rückmeldedaten

Die Rückmeldedaten sollten einen repräsentativen Zeitraum umfassen. Wiendahl schlägt als Richtwert für den Erfassungszeitraum das drei- bis vierfache der mittleren Auftragsdurchlaufzeit vor [Wien97, S. 187].

Der Umlaufbestand einer Fertigung ergibt sich aus der Summe der freigegebenen und noch nicht fertiggestellten Aufträge. Für die Berechnung sind folgende Daten erforderlich:

- Ist-Bearbeitungsbeginn des Auftrags ( $TAB_{ist}$ )
- Ist-Bearbeitungsende des Auftrags ( $TAE_{ist}$ )

Um die Terminabweichung im Abgang aus Rückstand zu ermitteln, ist zunächst der Fertigungsrückstands zu bestimmen. Der Rückstand beschreibt die Differenz aus tatsächlichem und geplantem Abgang der Fertigung. Der Rückstand wird über die Ist-Leistung in die Terminabweichung umgerechnet. Dazu sind folgende Daten notwendig:

- Ist-Bearbeitungsende des Auftrags ( $TAE_{ist}$ )
- Plan-Bearbeitungsende des Auftrags ( $TAE_{plan}$ )
- Auftragsgröße in Vorgabestunden (ZAU)

Kuyumcu stellt für die Berechnung der Reihenfolgedisziplin aus Rückmeldedaten einen Algorithmus vor, der auf Basis von Ist- und Plan-Terminen der Arbeitsvorgänge funktioniert [Kuyu13, S. 166f.]. Zur Anwendung dieses Algorithmus ist es notwendig, dass Aufträge mit ihrer Fertigstellung an einem Arbeitssystem unmittelbar dem Nachfolgearbeits-

system zu Verfügung stehen. Die Reihenfolgedisziplin wird dann aus den folgenden Daten berechnet:

- Ist-Bearbeitungsende eines Arbeitsvorgangs ( $TBE_{\text{ist}}$ )
- Plan-Bearbeitungsende eines Arbeitsvorgangs ( $TBE_{\text{plan}}$ )

### 7.2.3 Vergleich mit Rückmeldedaten

Der Vergleich von Wertstromanalyse und Rückmeldedaten soll übersichtlich und aussagekräftig gestaltet sein, um die Ergebnisse der Wertstromanalyse schnell bewerten zu können. Es bietet sich daher an, die Ergebnisse graphisch zu vergleichen. Aus den Rückmeldedaten ergeben sich für die logistischen Kennzahlen Verteilungen. Diese lassen sich klassieren und durch empirische Verteilungsfunktionen beschreiben. Abb. 7-1 zeigt ein Histogramm mit zusätzlicher Verteilungsfunktion für den Bestand in Anzahl Aufträgen einer Fertigung. Mit der Verteilungsfunktion lassen sich Anteilswerte unmittelbar angeben. Die Funktion bezeichnet in diesem Fall den Anteil der Betriebstage, an denen der Bestand höchstens  $x$  Aufträge beträgt. Bspw. liegt der Anteil der Tage, an denen der Bestand maximal 168 Aufträge beträgt, bei etwa 10 %. Ebenfalls 10 % beträgt der Anteil der Tage, an denen mehr als 242 Aufträge vorliegen. Trägt man nun zusätzlich den in der Wertstromanalyse ermittelten Wert ein (210 Aufträge), lassen sich der Einzelwert und die Verteilungsfunktion auf einen Blick vergleichen.

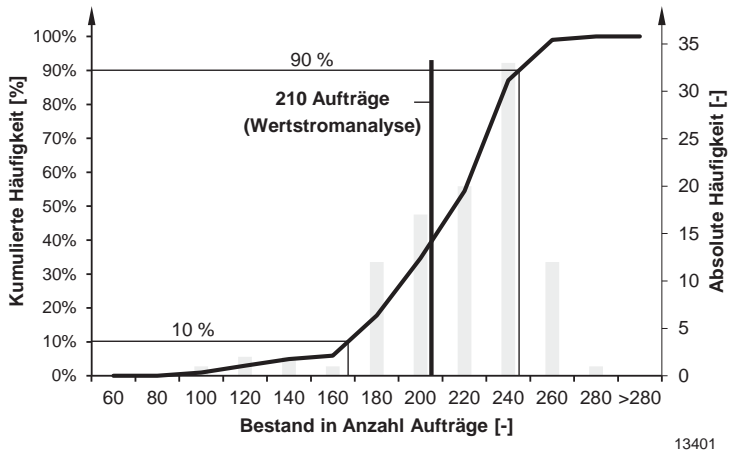


Abb. 7-1: Histogramm mit kumulierter Häufigkeit

Für die Reihenfolgedisziplin und die Terminabweichung können vergleichbare Graphen erstellt werden. Die Reihenfolgedisziplin aller Arbeitsvorgänge kann für die gesamte Fertigung tagesweise ermittelt und analog zum Bestand ausgewertet werden. Die Terminabweichung im Abgang kann für alle im Bezugszeitraum fertiggestellten Aufträge gemessen werden.

### 7.3 Fallstudie 1

Die Wertstrommethode wurde bei einem Hersteller von Präzisionsteilen durchgeführt, der schwerpunktmäßig Sonderanfertigungen herstellt (80 %). Das Unternehmen lässt sich in die Gruppe der Auftragsfertiger einordnen. Es fertigt an zwei Standorten, die einen durchgängigen Materialfluss besitzen. Am ersten Standort befinden sich der Wareneingang, das Rohmateriallager und Teile der mechanischen Fertigung. Am zweiten Standort befinden sich die Schleiferei, das Fertigwarenlager und der Versand. Die Evaluierung der Methode wurde am zweiten Standort durchgeführt.

#### 7.3.1 Beschreibung des Betrachtungsbereichs

Der betrachtete Bereich ist die Schleiferei des Unternehmens und besteht aus elf Arbeitssystemen, an denen 18 Produktionsmitarbeiter beschäftigt sind. Die Arbeitssysteme bestehen aus insgesamt 50 Arbeitsplätzen. Die gesamte Schleiferei ist in einem Fabrikgebäude untergebracht, sodass sich kurze Transportwege zwischen den Arbeitssystemen ergeben. Die Fertigungsaufträge werden täglich per LKW aus Werk 1 angeliefert und

anschließend im Logistikbereich gelagert. Der Fertigungsleiter der Schleiferei ordnet die Aufträge anschließend den Arbeitssystemen zu. Abb. 7-2 zeigt das Groblayout des betrachteten Bereichs.

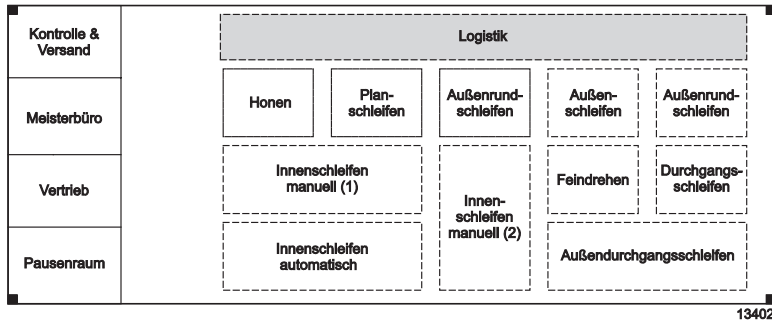


Abb. 7-2: Groblayout des betrachteten Bereichs

### 7.3.2 Anwendung der Wertstromanalyse

Die Wertstromanalyse folgt in diesem Praxisbeispiel dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Vorgehen aus Vorbereitung, Datenaufnahme, Datenintegration und Identifikation von Handlungsfeldern.

#### Vorbereitung

Die geringe Anzahl der Arbeitssystemen (elf) erlaubt es, die Fertigung an diesem Standort vollständig aufzunehmen. Es kann daher auf die Auswahl eines Bereichs verzichtet werden. Das Unternehmen hat vor der Wertstromanalyse Rückmeldedaten der Fertigung für einen Zeitraum von fünf Monaten bereitgestellt. Diese umfassen alle im Erhebungszeitraum erfassten Aufträge mit ihren Arbeitsvorgängen. Im Detail sind dies die Auftragsnummer, der Freigabezeitpunkt sowie das tatsächliche Bearbeitungsende und das geplante Bearbeitungsende des Auftrags. Zudem wurden für alle Vorgänge die Arbeitsvorgangsnummer, das Arbeitssystem, die Auftragszeit und das Ist-Bearbeitungsende erfasst. Die geplanten Bearbeitungsenden der Arbeitsvorgänge speichert das Unternehmen nicht. Es war möglich, aus den Rückmeldedaten die mittlere Leistung aller Arbeitssysteme zu bestimmen und aus den Arbeitsplänen eine Produkt-Arbeitssystem-Matrix zu erstellen.

#### Datenaufnahme

Die Datenaufnahme fand in der Mitte der regulären Frühschicht statt. An der Aufnahme waren eine betriebsfremde Person und zwei Mitarbeiter des Unternehmens beteiligt. Dies

waren der Fertigungsleiter der Schleiferei und ein Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung. Die Datenaufnahme wurde in zwei Schritten durchgeführt:

1. Experteninterview
2. Fertigungsrundgang

Im *Experteninterview* mit dem Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung konnten zunächst Informationen zur Auftragsannahme und -terminierung sowie zur Auftragsfreigabe gewonnen werden. Kundenanfragen können in diesem Fall täglich beim technischen Vertrieb eintreffen, der diese bei technischer Machbarkeit annimmt und eine pauschale Lieferzeit von 9 - 12 Wochen angibt. Bestätigt der Kunde das Angebot, werden die Kundenaufträge anschließend in die Arbeitsvorbereitung weitergeleitet. Dort erfolgt die Termin- und Kapazitätsplanung auf Basis des versprochenen Liefertermins. Die Plan-Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs setzt sich aus der Durchführungszeit eines Vorgangs und der Wartezeit am Arbeitssystem zusammen. Die Wartezeit wird je Arbeitssystem festgelegt und beträgt in den meisten Fällen 7 Stunden. Als eine Art Lieferzeitpuffer besitzt das letzte Arbeitssystem („Kontrolle“) eine deutlich längere Übergangszeit als die übrigen Arbeitssysteme (14 BKT). Zum geplanten Starttermin werden die Auftragsbegleitpapiere von Mitarbeitern der Arbeitsvorbereitung gedruckt und stehen der Fertigung zur Verfügung.

Im Anschluss an das Experteninterview fand der *Fertigungsrundgang* statt. Dabei haben die Methodenanwender die Datenaufnahme am letzten Arbeitssystem (Kontrolle & Versand) begonnen. Anschließend wurden alle Arbeitssysteme abgelaufen, ohne eine bestimmte Reihenfolge einzuhalten. An den elf Arbeitssystemen befanden sich während des Rundgangs 264 Aufträge. Alle Aufträge besaßen Begleitpapiere, auf denen Auftragszeiten und Vorgangstermine verzeichnet waren. Aus den Bestandsgrößen ließen sich die Durchlaufzeit und die Durchführungszeit jedes Arbeitssystems ermitteln. Darüber hinaus wurden an allen Arbeitssystemen die Plan-Ränge der in Bearbeitung befindlichen Aufträge notiert und die Terminabweichung des Arbeitssystems mit Hilfe der verbleibenden Durchlaufzeiten der Aufträge abgeschätzt. Abb. 7-3 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung der rückstandsbedingten Terminabweichung für das letzte Arbeitssystem im Auftragsdurchlauf („Kontrolle“). Aufträge besitzen an diesem System im Mittel eine geschätzte Terminabweichung von 13,5 BKT. Da es sich um das finale Arbeitssysteme aller Aufträge handelt, lassen sich folglich Rückschlüsse auf die mittlere Terminabweichung aus Rückstand aller Aufträge ziehen.

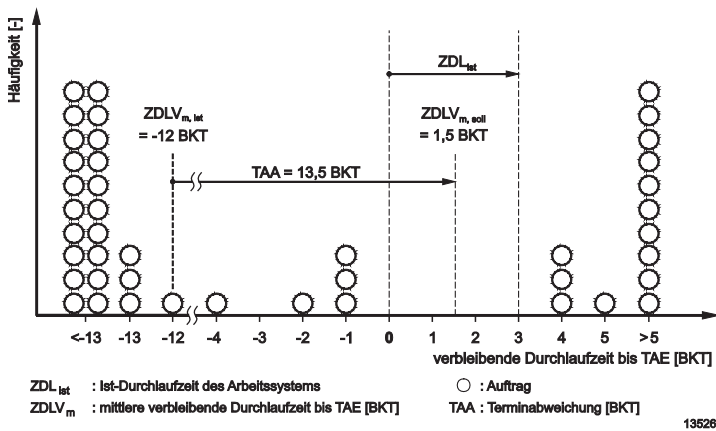


Abb. 7-3: Geschätzte Terminabweichung für das Arbeitssystem „Kontrolle“

Bemerkenswert ist in diesem Anwendungsbeispiel der Fluss der Aufträge durch die Fertigung. Dieser wird fast vollständig vom Fertigungsleiter koordiniert. An den Arbeitssystemen befinden sich in der Regel maximal zwei Aufträge: ein Auftrag in Bearbeitung und ein wartender Auftrag. Der Rest des Umlaufbestands befindet sich zentral im Logistikbereich. Läuft ein Arbeitssystem leer, meldet sich der entsprechende Mitarbeiter beim Fertigungsleiter, der dem Arbeitssystem neue Aufträge zuordnet. Dieses Vorgehen ist aus Sicht des Unternehmens notwendig, da sich die Dringlichkeit der Aufträge laufend verändert und die Qualität der Plan-Termine relativ schlecht ist.

Abb. 7-4 zeigt die Reihenfolgedisziplin des Fertigungsbereichs, die entsprechend gering ausfällt. In lediglich vier von 27 Fällen wurde der dringendste Auftrag ausgewählt. Dies entspricht einer Reihenfolgedisziplin von 15 %.

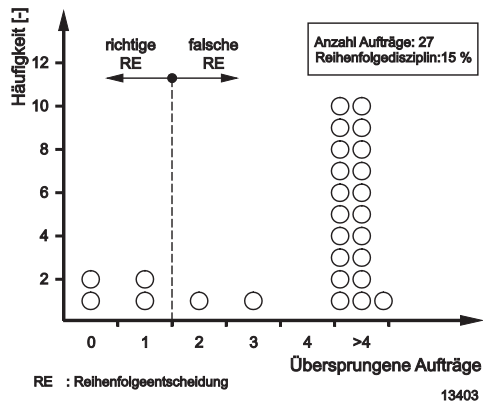


Abb. 7-4: Reihenfolgedisziplin in der Fertigung

### Datenintegration

In diesem Beispiel besitzen die Fertigungsaufträge eine relativ geringe Anzahl an Arbeitsvorgängen. Im Durchschnitt läuft ein Auftrag über drei bis vier Arbeitssysteme. Um den Wertstrom eines typischen Produkts darzustellen, wurde ein Produkt mit vier Arbeitsvorgängen ausgewählt. Abb. 7-5 zeigt die resultierende Wertstromkarte. Ausgehend von den Prozessbausteinen (Innenschleifen manuell, Außenschleifen, Innenschleifen automatisch, Kontrolle) wurden die Arbeitssysteminformationen, die logistischen Zielgrößen sowie Planungs- und Steuerungsvorgaben hinzugefügt.

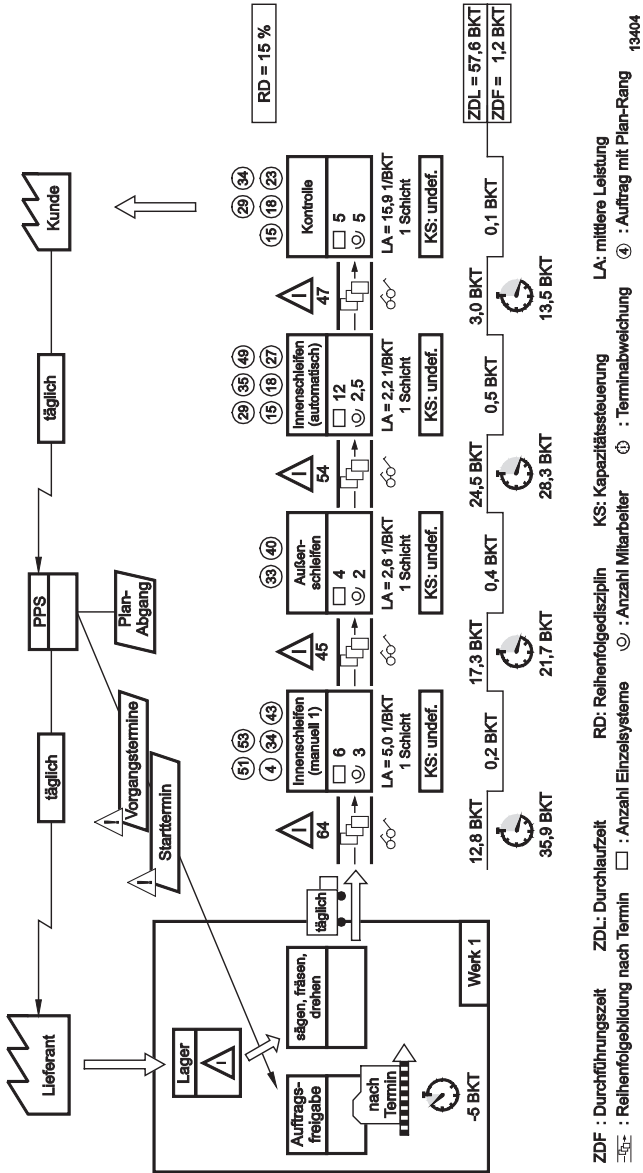


Abb. 7-5: Wertstromkarte des Fallbeispiels

### **Identifikation von Handlungsfeldern**

In der Wertstromkarte lassen sich auf einen Blick Handlungsfelder zur Verbesserung der logistischen Zielgrößen identifizieren, indem die in Abschnitt 3.2.4 vorgestellten Fragen gestellt werden.

1. Werden die Aufträge termingerecht freigegeben?  
Nach der Rückwärtsterminierung liegen die Starttermine der Arbeitsvorbereitung vor, die für die Freigabe der Aufträge zuständig ist. Die Aufträge sollen nach Termin freigegeben werden, die Freigabe erfolgt jedoch in der Regel verfrüht mit einem Vorgriff von 5 BKT. Die vorzeitige Freigabe soll eine rechtzeitige Fertigstellung der Aufträge gewährleisten.
2. Wird der Umlaufbestand der Fertigung geregelt?  
Der Umlaufbestand wird in diesem Fall nicht geregelt. Die Freigabe erfolgt losgelöst vom Abgang der Fertigung. Der Push-Pfeil der Auftragsfreigabe symbolisiert diese Steuerlogik. In Kombination mit der verfrühten Freigabe führt dies in der Schleiferei zu sehr hohen Beständen und entsprechend langen Durchlaufzeiten. Das ausgewählte Produkt weist eine Gesamtdurchlaufzeit von fast 60 BKT für vier Arbeitsvorgänge auf.
3. Ist eine termingerechte und umsetzbare Plan-Reihenfolge vorgegeben?  
Die Terminierung erstellt Plan-Termine für alle Arbeitsvorgänge und somit eine Plan-Reihenfolge für alle Aufträge. Die Planungsqualität ist jedoch nicht ausreichend, um einen umsetzbaren Fertigungsplan zu erstellen. Insbesondere die Plan-Übergangszeiten sind in hohem Maße unrealistisch. Die Vorgangstermine sind daher in der Wertstromkarte als vertrauensunwürdig gekennzeichnet.
4. Unterstützt die operative Reihenfolgebildung aktiv die Termintreue?  
Prinzipiell ist das Unternehmen bestrebt, die Aufträge in der Fertigung nach terminlicher Dringlichkeit zu behandeln. Die zuvor geplanten Vorgangstermine werden in der Regel dennoch nicht eingehalten, sondern manuell durch den Fertigungsleiter übersteuert. Die Reihenfolgebildung ist daher mit einer „Go see“-Steuerung gekennzeichnet und die Reihenfolgedisziplin des Gesamtbereichs mit 15 % entsprechend gering. Der hohe Bestand erleichtert zudem Reihenfolgevertauschungen.
5. Wird der Plan-Abgang an die Arbeitssysteme kommuniziert?  
Die PPS kommuniziert den Plan-Abgang nicht an die Arbeitssysteme. Der Rückstand kann daher an den Arbeitssystemen nicht gemessen und eingesehen werden. Die aktuelle Parametrisierung der Übergangszeiten führt darüber hinaus dazu, dass an den ersten Arbeitssystemen ein hoher Rückstand erzwungen wird, der am letzten Arbeitssystem durch einen großen Puffer in der Übergangszeit wieder abgeschwächt wird.
6. Wird eine systematische Kapazitätssteuerung umgesetzt?

Die Kapazitätssteuerung ist als (kurzfristige) Aufgabe im Unternehmen nicht definiert, sodass Rückstände auch nicht direkt aufgeholt werden können. Für eine sinnvolle Rückstandsregelung müssten zudem die Übergangszeiten angepasst werden.

### 7.3.3 Vergleich mit Rückmeldedaten

Für die Beurteilung der Aussagekraft der aufgenommenen Kennzahlen werden die Terminabweichung im Abgang und der Auftragsbestand mit Rückmeldedaten verglichen. Die Reihenfolgedisziplin kann nicht aus Rückmeldedaten ermittelt werden, da die Planbearbeitungsenden der Arbeitsvorgänge nicht im ERP-System gespeichert werden. Die Rückmeldedaten umfassen einen Zeitraum von fünf Monaten (Januar bis Mai 2016) und beinhalten 1374 Aufträge.

#### Bewertung der Terminabweichung

Abb. 7-6 zeigt die Verteilung der rückstandsbedingte Terminabweichung im Abgang. Die mittlere Terminabweichung beträgt in diesem Fall 4,6 BKT und streut sehr stark mit einer Standardabweichung von 7,0 BKT. Das 80 %-Vertrauensintervall für die Terminabweichung im Abgang aus Rückstand liegt zwischen -1 BKT und 12 BKT und ist somit relativ groß.

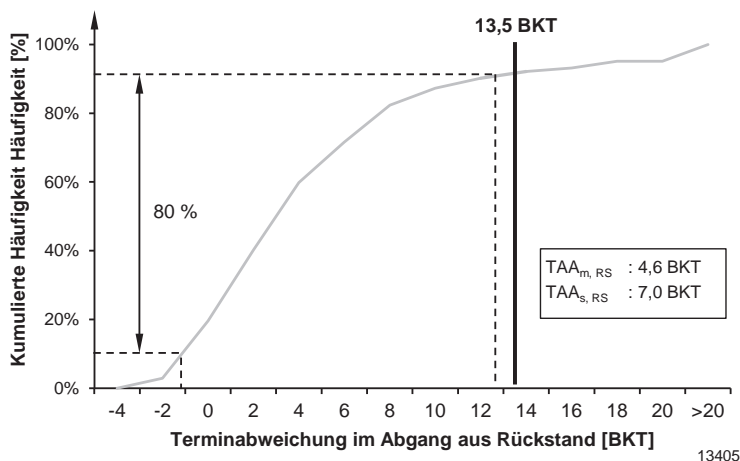


Abb. 7-6: Terminabweichung im Abgang der Aufträge

In der Wertstromanalyse wurde an der letzten Arbeitsstation („Kontrolle und Versand“) eine Terminabweichung von 13,5 BKT geschätzt. Dies entspricht einer Abweichung zur

mittleren rückstandsbedingten Terminabweichung von 9 BKT. Am Tag der Datenaufnahme kann aus den Rückmeldedaten eine rückstandsbedingte Terminabweichung von 7,1 BKT ermittelt werden. Der Arbeitsinhalt eines Auftrags ist relativ groß und kann mehrere Tage umfassen. Da keine Teilmengen von Aufträgen rückgemeldet werden, schwankt der tagesweise gemessene Rückstand somit stark. Betrachtet man einen Bereich von  $\pm 5$  BKT um den Tag der Datenaufnahme, so ergibt sich an diesen Tagen eine mittlere Terminabweichung aus Rückstand von 11,6 BKT. Der Schätzwert aus der Wertstromanalyse (13,5 BKT) spiegelt die Größenordnung der rückstandsbedingten Terminabweichung hinreichend genau wider, um geeignete Maßnahmen in der Kapazitätssteuerung treffen zu können.

### Bewertung des Bestands

In der Wertstromanalyse wurde über alle Arbeitssystemen ein Bestand von 264 Aufträgen gezählt. Dieser Wert ist zum Vergleich in die die Darstellung der kumulierten Häufigkeit des gemessenen Bestands eingetragen (Abb. 7-7). Aus den Rückmeldedaten ergibt sich ein mittlerer Bestand von 232 Aufträgen. Der gezählte Bestand ist um 14 % höher als der aus Rückmeldedaten bestimmte mittlere Bestand. Dies liegt neben der Streuung auch an der mangelnden systemseitigen Registrierung der Aufträge: Von den 264 tatsächlich vorliegenden Aufträgen waren lediglich 222 durch das BDE-System erfasst.

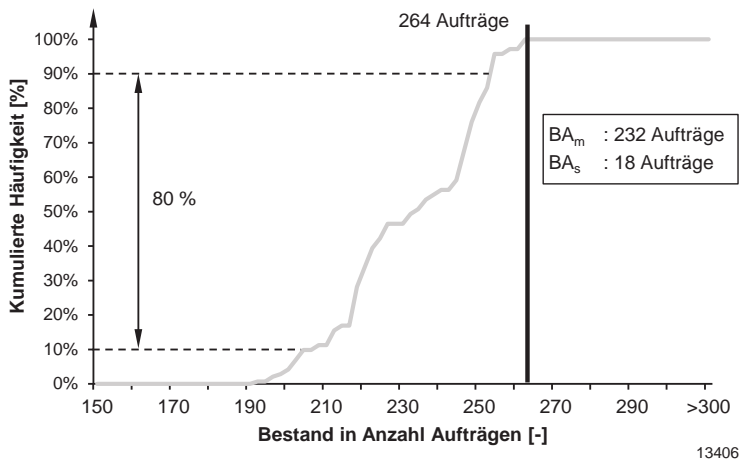


Abb. 7-7: Vergleich von gemessenem und in der Fertigung gezähltem Bestand

Hier zeigt sich die Stärke der Aufnahme vor Ort: sie ist nicht auf Rückmeldedaten angewiesen, die, wie in diesem Fall, nicht immer von hoher Qualität sind. Die fehlenden Auf-

träge führen zudem dazu, dass der Rückstand aus den Rückmeldedaten niedriger erscheint als tatsächlich bei der Erhebung vor Ort.

Für die betrachtete Fertigung kann konstatiert werden, dass die Höhe des Bestands auf Fertigungsebene noch moderaten Schwankungen ausgesetzt ist. An 80 % der Tage im Betrachtungszeitraum liegt der (erfasste) Bestand zwischen 205 und 253 Aufträgen. Es zeigt sich in diesem Fall, dass der auf Fertigungsebene erfasste Bestand in der Wertstromanalyse ein recht guter Repräsentant des dynamischen Umlaufbestands der Fertigung ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gesamtbestand einer Fertigung im Vergleich zu den Beständen der Einzelsysteme relativ geringen Schwankungen unterliegt. Tab. 7-2 zeigt die relative Höhe der Bestandsschwankungen anhand der Variationskoeffizienten auf. Dieser liegt für die Fertigung deutlich unter den Koeffizienten der einzelnen Arbeitssysteme.

**Tab. 7-2:** Variationskoeffizienten für Gesamtfertigung und relevante Arbeitssysteme

Bereich	$BA_m$	$BA_s$	Variationskoeffizient
<i>Gesamte Fertigung</i>	232	18	0,08
Kontrolle	59,3	7,5	0,13
Innenschleifen (man.)	26,2	4,1	0,16
Außendurchgangsschleifen	27,4	4,6	0,17
Außenschleifen	35,4	6,0	0,17
Innenschleifen (autom.)	18	3,4	0,19
CNC-Feindrehen	6,6	1,6	0,24
Außenrundscheifen	5,5	1,8	0,34
Innenschleifen (man. 2)	6,7	2,7	0,40
Planschleifen	3,8	2,0	0,52

$BA_m$  : Mittlerer Bestand in Anzahl Aufträge [-]

$BA_s$  : Standardabweichung des Bestands [-]

### Bewertung der Reihenfolgedisziplin

Die Reihenfolgedisziplin der Fertigung kann in diesem Fallbeispiel nicht aus den Rückmeldedaten ermittelt werden. Zwar werden die Plan-Vorgangstermine für alle Aufträge erstellt, sie werden jedoch nicht in einem ERP- oder Produktionsleitsystem gespeichert. Eine Auswertung ist daher nicht möglich.

Tab. 7-3 fasst die Ergebnisse des Vergleichs für dieses Anwendungsbeispiel zusammen.

**Tab. 7-3:** Vergleich von Kennzahlen aus der Wertstromanalyse mit Rückmeldedaten

Zielgröße	Wert aus der Wertstromanalyse	Mittelwert aus Rückmeldedaten	Differenz
Bestand	264 Aufträge	232 Aufträge	32 Aufträge
Terminabweichung aus Rückstand	13,5 BKT	4,6 BKT	8,9 BKT
Reihenfolgedisziplin	15 %	-	-

### 7.3.4 Anwendung des Wertstromdesigns für Auftragsfertiger

Die Wertstromanalyse hat einen zwingenden Handlungsbedarf für alle Elemente des Wertstromdesigns ermittelt. Dies betrifft sowohl Planungs- als auch Steuerungsaufgaben. Dieser Abschnitt prüft für alle Leitlinien, ob sie im Anwendungsbeispiel anwendbar sind. Anschließend wird das Design als Soll-Wertstrom grafisch abgebildet.

#### **Leitlinie 1: Bestimmen Sie verlässliche Termine für Ihre Aufträge**

Das im Unternehmen vorhandene ERP-System ermittelt derzeit in einer Rückwärtsterminierung ausgehend von einem Kundenwunschtermin die Start- und die Vorgangstermine der Aufträge. Die Plan-Übergangszeiten der Arbeitssysteme müssen dringend angepasst werden. Diese sind für die Mehrzahl der Arbeitssysteme zu niedrig eingestellt und am Arbeitssystem *Kontrolle & Versand* zu hoch. Die bestandsbedingten Wartezeiten können bspw. mit Hilfe von Produktionskennlinien modelliert werden (vgl. [Nyhu12]).

#### **Leitlinie 2: Kontrollieren Sie den Zugang zur Fertigung durch eine Conwip-Steuerung**

Die Einführung einer Conwip-Steuerung ist in diesem Fall möglich und zudem aufgrund des sehr hohen Umlaufbestands dringend empfohlen. Eine Conwip-Steuerung würde zudem die Koordination zwischen beiden Werken unterstützen. Da der Conwip-Regelkreis beide Werke umfasst, sollte eine elektronische Conwip-Steuerung eingesetzt werden. Diese informiert die Arbeitsvorbereitung in Werk 1, die für die Auftragsfreigabe zuständig ist, sobald ein Auftrag in Werk 2 fertiggestellt wurde. Die Anzahl der Karten sollte mit den Plan-Durchlaufzeiten der Arbeitssysteme (Leitlinie 1) abgestimmt sein. In diesem Fall soll eine Durchlaufzeit von zwei Tagen an allen Arbeitssystemen erreicht werden.

**Leitlinie 3: Berücksichtigen Sie die Dringlichkeit eines Auftrags bei der Reihenfolgebildung**

Sind verlässliche Plan-Endtermine bestimmt, spiegeln diese die Dringlichkeit des Auftrags wider und können als Kriterium für die Reihenfolgebildung genutzt werden. Ziel ist es, die Reihenfolgebildung direkt durch die Maschinenbediener vornehmen zu lassen, so dass keine manuelle Übersteuerung der Plan-Termine mehr notwendig ist. Die Arbeitssysteme sollten hierfür mit geeigneten Auftragstafeln ausgestattet werden, um die Aufträge an den Arbeitssystemen sortieren zu können. Aufgrund des geringeren Bestands ist es möglich, die Aufträge direkt an den Arbeitssystemen zu platzieren und nicht im Logistikbereich.

**Leitlinie 4: Kommunizieren Sie den Plan-Abgang an alle Arbeitssysteme**

Die Plan-Abgänge der einzelnen Arbeitssysteme sind mit der Terminierung von Aufträgen bekannt und können daher an die Arbeitssysteme kommuniziert werden. Aufgrund der Kompaktheit der Fertigung wäre bereits ein zentraler Monitor mit den entsprechenden Daten für die gesamte Fertigung als Informationsquelle ausreichend. Diese Informationsquelle wird als Monitor in der Wertstromkarte des Soll-Zustands dargestellt.

**Leitlinie 5: Beseitigen Sie Rückstände an den Arbeitssystemen durch eine systematische Rückstandsregelung**

Das Unternehmen weist eine ausreichende Kapazitätsflexibilität auf, um eine systematische Rückstandsregelung anzuwenden. Eine Wochenendschicht, ursprünglich als Zusatzschicht geplant, um Rückstände abzubauen, wird nicht konsequent genutzt. Bei einer zuverlässigen und objektiven Rückstandsmessung kann diese Schicht dazu genutzt werden, Rückstände relativ kurzfristig abzubauen. Ziel sollte es sein, Terminabweichungen, die größer als ein Betriebskalendertag sind, zu vermeiden.

Da das Wertstromdesign für Auftragsfertiger keine physischen Umstellungen in der Fertigung vornimmt, ist der Materialfluss im Soll-Zustand identisch zum Ist-Zustand (Abb. 7-8). Der Soll-Zustand enthält jedoch die neugestalteten Informationsflüsse der Fertigung und liefert Zielvorgaben für die logistischen Zielgrößen.

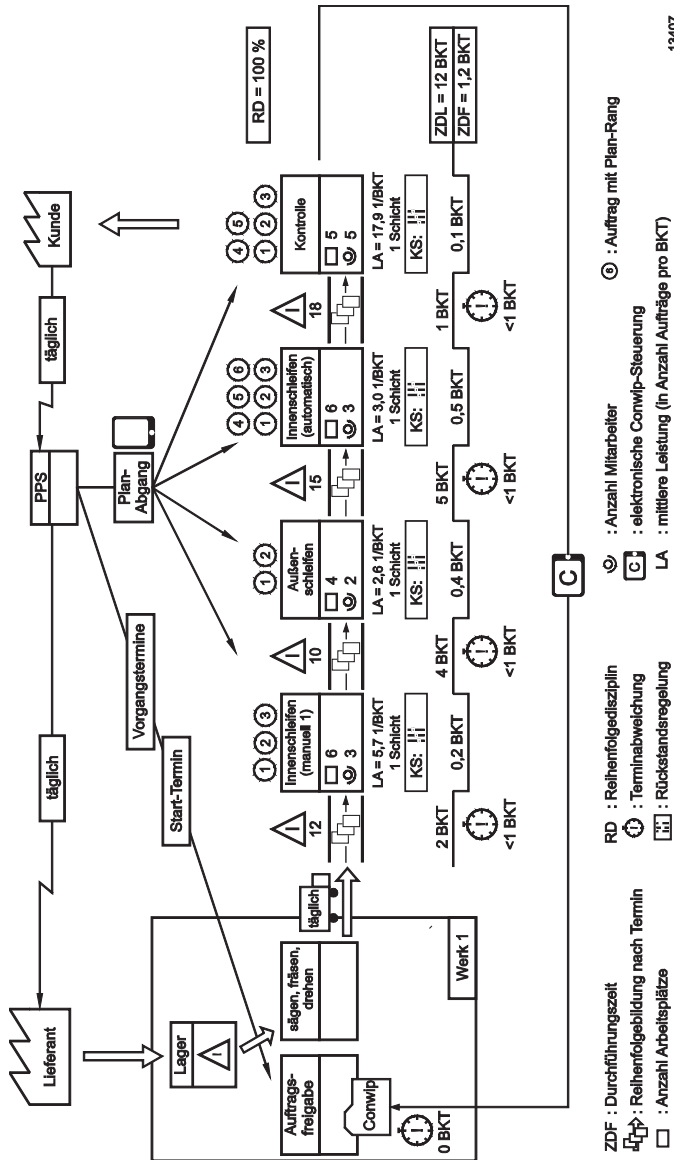


Abb. 7-8: Darstellung des Soll-Zustands der Fertigung

### 7.3.5 Kritische Würdigung des Fallbeispiels

In diesem Anwendungsbeispiel ist es gelungen, die entwickelte Wertstrommethode in der Fertigung eines Auftragsfertigers anzuwenden.

Die Wertstromanalyse führt in einem eintägigen Workshop zu einer guten Transparenz der logistischen Zielgrößen. Das Unternehmen weist in der Gestaltung der gesamten Produktionsplanung und -steuerung (Terminierung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung) Schwachstellen auf. Rückstände werden in der Fertigung nicht systematisch beseitigt, summieren sich auf und führen zu großen Terminabweichungen im Abgang (13,5 BKT). Zudem erfolgt der Zugang von Aufträgen in die Fertigung trotz Rückständen weiterhin zum geplanten Termin, was zu einem sehr hohen Bestandsniveau innerhalb der Fertigung führt. Die Bestandsreichweite beträgt an einzelnen Arbeitssystemen bis zu 4 Wochen (20 BKT). Dies resultiert in einer sehr langen Durchlaufzeit von etwa 60 BKT für das dargestellte Produkt. Die Reihenfolgebildung ist aufgrund nicht belastbarer Plantermine sehr aufwändig und muss vom Fertigungsleiter an allen Arbeitssystemen manuell durchgeführt werden. Der hohe Umlaufbestand erschwert dieses Vorgehen zusätzlich.

Kritisch zu betrachten ist die eingeschränkte Aussagefähigkeit der Wertstromanalyse bei nicht vertrauenswürdigen Plan-Daten. In diesem Anwendungsbeispiel werden Aufträge teilweise nicht auf den Arbeitssystemen bearbeitet, die auf den Auftragsbegleitpapieren hinterlegt sind. Eine Zuordnung von Auftrag und nächstem Arbeitssystem findet häufig spontan durch den Fertigungsleiter statt und kann zum Zeitpunkt des Rundgangs noch nicht abgesehen werden. Dies verzerrt die Bestandssituation der einzelnen Arbeitssysteme und damit auch die Qualität der Aussage zur Durchlaufzeit und Reihenfolgedisziplin.

Der Vergleich der erhobenen Kennzahlen mit Rückmeldedaten gelingt in diesem Fall eingeschränkt: Die Reihenfolgedisziplin der Fertigung kann nicht für einen längeren Zeitraum ausgewertet werden. Die mittlere rückstandsbedingte Terminabweichung weicht zwar stark von dem geschätzten Wert aus der Wertstromanalyse ab, dies ist jedoch auf starke Rückstandsschwankungen innerhalb der Fertigung zurückzuführen. Der mittlere Bestand aus Rückmeldedaten ist in diesem Fall um 14 % geringer als der gezählte Bestand, was u.a. auf die mangelnde Konsistenz zwischen ERP-System und realer Fertigung zurückzuführen ist. Es zeigen sich an dieser Stelle wesentliche Stärken der entwickelten Methode: Erst die Aufnahme vor Ort ermöglicht eine realistische Bewertung des Bestands; die Skepsis gegenüber den Rückmeldedaten ist daher gerechtfertigt. Zum andere ist erst durch das Blitzlichtverfahren eine sinnvolle Aussage über die Terminabweichung aus Rückstand und die tatsächliche Durchlaufzeit möglich.

Alle Elemente des Wertstromdesigns könnten in diesem Anwendungsbeispiel angewendet werden und hätten einen positiven Einfluss auf die logistischen Zielgrößen der Fertigung. Der Fertigungsleiter hat bei der Unternehmensführung den Anstoß gegeben, eine Conwip-Steuerung einzuführen. Mit Unterstützung der Wertstromkarte des Soll-Zustands lässt sich zudem die Funktionsweise der Methoden anschaulich erläutern. Die Wertstrommethode hat daher ihr Teilziel erreicht, als Kommunikationswerkzeug genutzt zu werden und Verbesserungsprozesse im Unternehmen anzuregen.

## **7.4 Fallstudie 2**

Die zweite Praxiserprobung der Wertstrommethode fand in der Teilefertigung eines Herstellers von Industriegetrieben statt. Das mittelständische Unternehmen produziert kundenindividuelle Getriebe und ist ein klassischer Auftragsfertiger. Die Dokumentation der Evaluierung gleicht dem ersten Praxisbeispiel.

### **7.4.1 Beschreibung des Betrachtungsbereichs**

Die Fertigung des Unternehmens weist die typischen Merkmale einer Werkstattfertigung auf: Die einzelnen Bereich der Fertigung sind nach den Fertigungstechnologien strukturiert und die Werkstücke fließen losweise durch die Fertigung. In den Werkstätten finden folgende Prozesse statt:

- Drehen
- Verzahnen
- Stoßen
- Schleifen / Honen
- Fräsen / Bohren (Bearbeitungszentren)
- Nuten

In diesen sechs Werkstätten befinden sich 27 Arbeitssysteme mit insgesamt 42 Maschinen. Zusätzlich existiert noch die Bereitstellung als separates Arbeitssystem mit zwei Maschinen. Der größte Bereich ist die Dreherei mit 8 Arbeitssystemen (15 Drehmaschinen). Die gesamte Fertigung ist in zwei Gebäuden untergebracht, sodass sich teilweise relativ lange Transportwege zwischen den Arbeitssystemen ergeben.

### **7.4.2 Anwendung der Wertstromanalyse**

Die Wertstromanalyse folgt in diesem Praxisbeispiel ebenfalls dem in Abschnitt 3.2 entwickeltem Vorgehen aus Vorbereitung, Datenaufnahme, Datenintegration sowie der Identifikation von Handlungsfeldern.

## **Vorbereitung**

Auch in diesem Anwendungsbeispiel war keine Bereichsauswahl notwendig. Das Unternehmen hat Rückmeldedaten der Fertigung über einen Zeitraum von sechs Monaten bereitgestellt, die alle im Erhebungszeitraum rückgemeldeten Aufträge mit ihren Arbeitsvorgängen erfassen. Auf Auftragsebene sind dies die Auftragsnummer, der Freigabezeitpunkt, das tatsächliche Bearbeitungsende sowie das geplante Bearbeitungsende des Auftrags. Zusätzlich wurden die Arbeitsvorgangsnummer, das Arbeitssystem, die Auftragszeit sowie die geplanten und das tatsächlichen Bearbeitungsenden der Arbeitsvorgänge erfasst. Mit Hilfe der Rückmeldedaten konnten die Leistungskennzahlen aller Arbeitssysteme bestimmt werden.

## **Datenaufnahme**

Die Datenaufnahme fand an einem Vormittag während der regulären Frühschicht statt. An der Aufnahme waren zwei betriebsfremde Personen und der Leiter der Arbeitsvorbereitung des Unternehmens beteiligt. Die Datenaufnahme wurde in zwei Schritten durchgeführt:

1. Experteninterview
2. Fertigungsrundgang

Im *Experteninterview* mit dem Leiter der Arbeitsvorbereitung wurden zunächst Informationen zur Auftragsannahme und -terminierung sowie zur Auftragsfreigabe im Unternehmen erhoben. In diesem Fall treffen täglich Kundenanfragen beim Vertrieb ein. Dieser erhält von der Produktionsplanung und -steuerung wochenaktuelle Informationen über die Durchlaufzeiten der Fertigung und kann im Angebot entsprechende Lieferzeiten für die angefragten Produkte nennen. Bestätigt der Kunde das Angebot, findet die Terminierung statt. Die Freigabe eines Auftrags in die Fertigung erfolgt anschließend zum terminierten Starttermin.

Im *Fertigungsrundgang* konnten alle relevanten Informationen gewonnen werden. In diesem Fall ist die Materialbereitstellung der erste Arbeitsvorgang, sodass dieses Arbeitssystem der Ausgangspunkt Rundgangs war. Der Umlaufbestand der Fertigung befand sich zu großen Teilen direkt an den Arbeitssystemen. Insgesamt wurden in der Fertigung 236 Aufträge gezählt, die jeweils mit vollständigen Auftragspapieren ausgestattet waren und von denen sich 29 in Bearbeitung befanden. Für alle Arbeitssysteme konnten Durchlaufzeit und Terminabweichung bestimmt werden. Da am Arbeitssystem „Endprüfung“, das typischerweise zuletzt von Aufträgen durchlaufen wird, lediglich ein Auftrag vorlag, konnte für dieses System keine verlässliche rückstandsbedingte Terminabweichung geschätzt werden. Stattdessen wird in diesem Beispiel das Arbeitssystem gewählt, das üblicherweise als letztes System der mechanischen Bearbeitung durchlaufen wird: „Schlei-

fen“. Abb. 7-9 zeigt für das Arbeitssystem die geschätzte rückstands-basierte Terminabweichung; diese beträgt etwa 14 BKT.

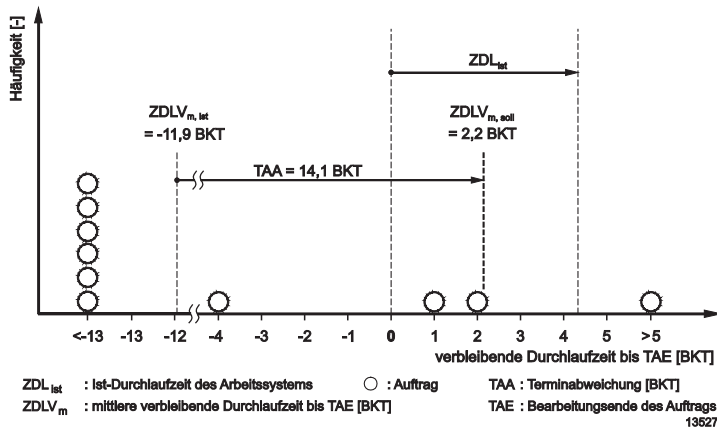


Abb. 7-9: Geschätzte Terminabweichung für das Arbeitssystem „Schleifen“

Für den Fertigungsbereich konnte zudem die Reihenfolgedisziplin ausgewertet werden. In 17 von 29 Fällen wurden die aus Terminalsicht dringlichsten Aufträge ausgewählt. Dies entspricht einer Reihenfolgedisziplin von 59 % (Abb. 7-10). Als Besonderheit lässt sich für diesen Bereich festhalten, dass es trotz der relativ großen Reihenfolgedisziplin einige Aufträge gibt, die eine besonders große Reihenfolgeabweichung von über 4 Aufträgen besitzen und dadurch entsprechend große Terminabweichungen erzeugen.

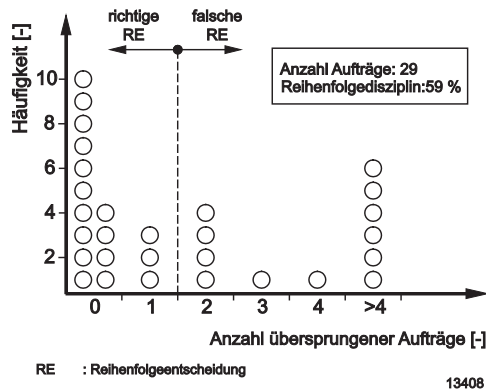


Abb. 7-10: Reihenfolgedisziplin Anwendungsbeispiel 2

### Datenintegration

Aus den gesammelten Informationen wurde die Wertstromkarte für ein Produkt erstellt, das zehn Arbeitsvorgänge besitzt. Abb. 7-11 zeigt einen Ausschnitt der Wertstromkarte für dieses Produkt. Ausgehend von den Prozessen wurden die Arbeitssysteminformationen, die logistischen Zielgrößen sowie Planungs- und Steuerungsvorgaben hinzugefügt.

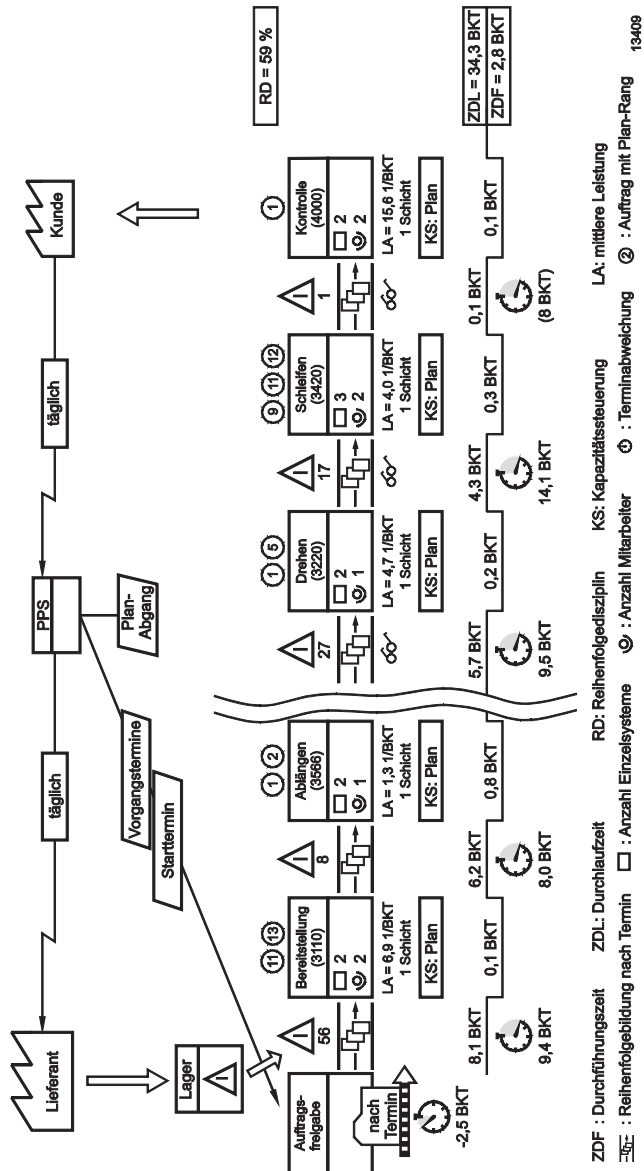


Abb. 7-11: Wertstromkarte des Fallbeispiels

### **Identifikation von Handlungsfeldern**

Aus der Wertstromkarte lassen sich auch in diesem Anwendungsbeispiel Handlungsfelder zur Verbesserung der logistischen Zielgrößen identifizieren, indem die in Abschnitt 3.2.4 vorgestellten Fragen gestellt werden.

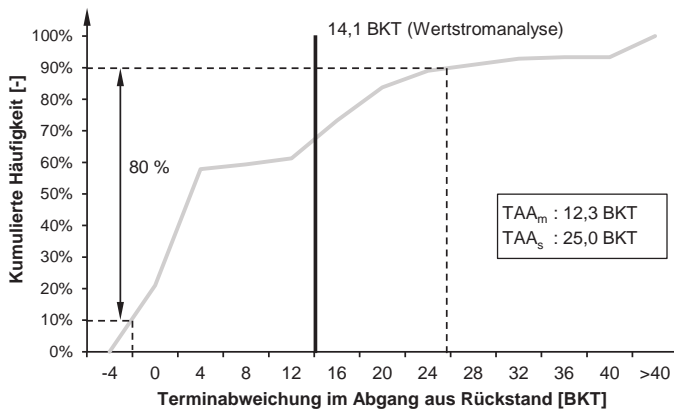
1. Werden die Aufträge termingerecht freigegeben?  
Nach der Rückwärtsterminierung liegen die Starttermine der Arbeitsvorbereitung vor, die für die Freigabe der Aufträge zuständig ist. Die Aufträge sollen nach Termin freigegeben werden, die Freigabe erfolgt jedoch in der Regel frühzeitig mit einem Vorgriff von 2,5 BKT. Dies ist in der Wertstromkarte als Terminabweichung im Zugang gekennzeichnet.
2. Wird der Umlaufbestand der Fertigung geregelt?  
Der Umlaufbestand wird in diesem Fall nicht geregelt. Die Freigabe erfolgt losgelöst vom Abgang der Fertigung. Der Push-Pfeil der Auftragsfreigabe symbolisiert diese Steuerungslogik. Zusammen mit der verfrühten Freigabe führt dies insbesondere am ersten Arbeitssystem zu hohen Beständen und langen Durchlaufzeiten. Das ausgewählte Produkt weist eine Gesamtdurchlaufzeit von etwa 34 BKT bei einer Gesamtdurchführungszeit von 3 BKT auf.
3. Ist eine termingerechte und umsetzbare Plan-Reihenfolge vorgegeben?  
Die Terminierung erstellt Plan-Termine für alle Arbeitsvorgänge und somit eine Plan-Reihenfolge für alle Aufträge. Die Vorgangstermine sind für die Produktionsmitarbeiter einsehbar und die Plan-Reihenfolge kann dementsprechend in der Fertigung umgesetzt werden.
4. Unterstützt die operative Reihenfolgebildung aktiv die Termintreue?  
Die zuvor geplanten Vorgangstermine werden in sechs von zehn Reihenfolgeentscheidungen eingehalten. An einzelnen Arbeitssystemen liegt jedoch eine besonders große Reihenfolgeabweichung vor (vgl. Abb. 7-10). Beispielhaft sei hier das erste Arbeitssystem genannt, an dem das hohe Bestandsniveau Reihenfolgevertauschungen erleichtert. Die erzeugten Reihenfolgeabweichungen beeinträchtigen die folgenden Arbeitssysteme, an denen die Reihenfolgevertauschungen wieder korrigiert werden müssen.
5. Wird der Plan-Abgang an die Arbeitssysteme kommuniziert?  
Die PPS kommuniziert den Plan-Abgang nicht an die Arbeitssysteme. Der Rückstand kann an den Arbeitssystemen entsprechend nicht systematisch gemessen werden.
6. Wird eine systematische Kapazitätssteuerung umgesetzt?  
Das Unternehmen führt im Wesentlichen eine Planorientierte Kapazitätssteuerung durch, indem die Meister der Bereiche mehrfach qualifizierte Mitarbeiter als Springer an unterbesetzten Arbeitssystemen einsetzen. Es zeigt sich jedoch, dass Rückstände nicht vollständig aufgeholt werden und in einer Terminabweichung aus Rückstand von etwa 14 BKT resultieren.

### 7.4.3 Vergleich mit Rückmeldedaten

In diesem Beispiel werden die in der Wertstromanalyse aufgenommenen Werte für die rückstandsbedingte Terminabweichung, den Bestand und die Reihenfolgedisziplin mit Rückmeldedaten verglichen. Die Rückmeldedaten umfassen einen Zeitraum von fünf Monaten (September 2015 bis Januar 2016).

#### Bewertung der Terminabweichung

Abb. 7-12 zeigt die Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung im Abgang der Fertigung. Die mittlere Terminabweichung beträgt in diesem Fall 12,3 BKT und streut sehr stark mit einer Standardabweichung von 25,0 BKT. Das 80 %-Vertrauensintervall für die Terminabweichung im Abgang aus Rückstand liegt zwischen -2 BKT und 26 BKT und ist somit relativ groß.



**Abb. 7-12:** Terminabweichung im Abgang der Aufträge

In der Wertstromanalyse wurde am letzten Arbeitssystem der mechanischen Fertigung („Schleifen“) eine Terminabweichung von 14,1 BKT geschätzt. Dies entspricht einer Abweichung zur mittleren rückstandsbedingten Terminabweichung von 1,8 BKT. Für den Tag der Datenaufnahme kann aus den Rückmeldedaten eine rückstandsbedingte Terminabweichung von 13,1 BKT ermittelt werden. Der Schätzwert aus der Wertstromanalyse (14,1 BKT) spiegelt die Größenordnung der rückstandsbedingten Terminabweichung recht genau wider und ermöglicht somit geeignete Maßnahmen zur Kapazitätssteuerung.

### Bewertung des Bestands

In der Wertstromanalyse wurde über alle Arbeitssysteme ein Bestand von 246 Aufträgen gezählt. Dieser Wert ist zum Vergleich in die Darstellung der kumulierten Häufigkeit des gemessenen Bestands eingetragen (Abb. 7-13). Aus den Rückmeldedaten ergibt sich ein mittlerer Bestand der Fertigung von 276 Aufträgen. Der gezählte Bestand ist damit um 10 % geringer als der aus den Rückmeldedaten bestimmte mittlere Bestand. Das 80 %-Vertrauensintervall liegt in diesem Fall zwischen 200 und 330 Aufträgen.

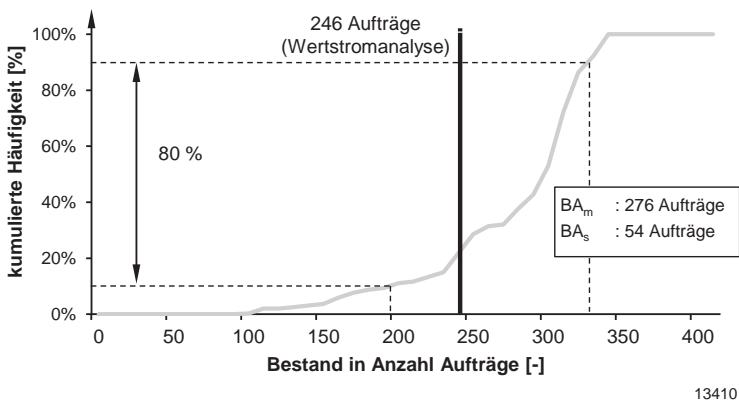


Abb. 7-13: Vergleich von gemessenem und in der Fertigung gezähltem Bestand

Die Wertstromaufnahme fand zu Jahresbeginn statt. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich, bedingt durch die vorangegangenen Betriebsferien, relativ wenige Aufträge im Bestand. Dadurch ist die geringe Differenz zum mittleren Bestand zu erklären. Der Wert aus der Wertstromanalyse befindet sich jedoch in diesem Fall innerhalb des 80 %-Vertrauensintervalls. Die Bestandsaussagekraft ist somit für die Gesamtfertigung relativ hoch. Einerseits ist die Rückmeldequalität im Unternehmen sehr gut und zum anderen schwankt auch in diesem Beispiel der Gesamtbestand der Fertigung deutlich geringer als der Bestand der einzelnen Arbeitssysteme. Tab. 7-4 zeigt dies anhand der Variationskoeffizienten der Bestandsgrößen auf. Dieser liegt für die Gesamtfertigung bei etwa 0,2 und beträgt für die Einzelsysteme bei mindestens 0,4.

**Tab. 7-4:** Variationskoeffizienten für Gesamtfertigung und relevante Arbeitssysteme

Bereich / Arbeitssystem	$BA_m$	$BA_s$	Variationskoeffizient
<i>Gesamte Fertigung</i>	276	54	0,2
Bearbeitung (3550)	16,9	6,1	0,4
Drehen (3260)	12,2	5,0	0,4
Verzahnen (3310)	10,6	4,6	0,4
Schleifen (3420)	22,6	10,7	0,5
Drehen (3220)	16,8	8,5	0,5
Drehen (3231)	4,3	2,3	0,5
Drehen (3232)	3,0	1,6	0,5
Materialbereitstellung	16,5	9,0	0,6
...	...	...	...
Drehen (3227)	1,8	2,1	1,2

$BA_m$  : Mittlerer Bestand in Anzahl Aufträge [-]

$BA_s$  : Standardabweichung des Bestands [-]

### Bewertung der Reihenfolgedisziplin

Um die Reihenfolgedisziplin aus Rückmeldedaten zu bestimmen, wurden alle Arbeitsvorgänge im Untersuchungszeitraum tagesweise ausgewertet. Abb. 7-14 zeigt die resultierende Verteilung der Reihenfolgedisziplin. Insgesamt wurden 131 Betriebskalendertage ausgewertet. Zunächst fällt auf, dass die Reihenfolgedisziplin in der Wertstromanalyse deutlich größer ausfällt als der aus den Rückmeldedaten bestimmte Mittelwert. Zudem streut die Reihenfolgedisziplin je Tag sehr stark; darauf deutet die Standardabweichung von 13 % hin. Das 80 %-Vertrauensintervall für die Reihenfolgedisziplin liegt zwischen 22 und 48 %.

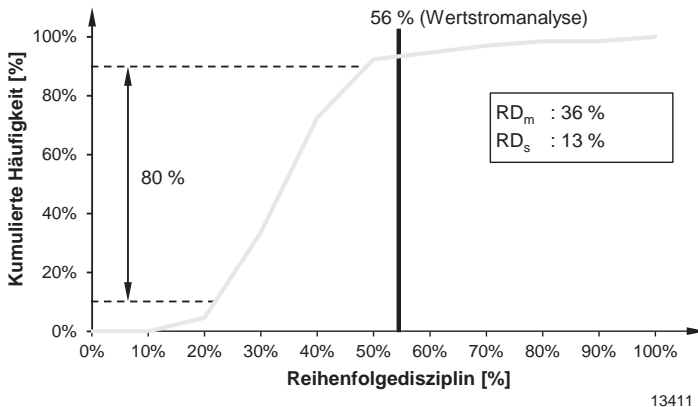


Abb. 7-14: Auswertung der Reihenfolgedisziplin

Der relativ hohe Wert für die Reihenfolgedisziplin aus der Wertstromanalyse kann einerseits auf die Toleranz bei der Bestimmung des Wertes zurückgeführt werden. Es werden auch Aufträge mit der zweithöchsten Dringlichkeit als richtig bewertet. Würde nur jeweils der Auftrag mit der höchsten Dringlichkeit als richtig bewertet, würde sich die Reihenfolgedisziplin auf 48 % reduzieren. Zum anderen gewichtet das Verfahren aus der Wertstromanalyse alle Arbeitssysteme gleich. Existiert in der Praxis ein System, das sehr viele Arbeitsvorgänge und eine sehr geringe Reihenfolgedisziplin besitzt, verzerrt die Gleichgewichtung in der Wertstromanalyse das Resultat. Gewichtet man bspw. ein Arbeitssystem über dessen Leistung in Anzahl Aufträge, ergibt sich eine etwas geringere Reihenfolgedisziplin von 49 %.

Tab. 7-5 fasst die Ergebnisse des Vergleichs für diese Fallstudie zusammen.

Tab. 7-5: Vergleich von Kennzahlen aus der Wertstromanalyse mit Rückmeldedaten

Zielgröße	Wert aus der Wertstromanalyse	Mittelwert aus Rückmeldedaten	Differenz
Bestand	246 Aufträge	276 Aufträge	30 Aufträge
Terminabweichung	14,1	12,3 BKT	1,8 BKT
Reihenfolgedisziplin	56 %	36 %	20 %

#### **7.4.4 Anwendung des Wertstromdesigns für Auftragsfertiger**

Die Wertstromanalyse hat einen Handlungsbedarf für einige Elemente des Wertstromdesigns ermittelt. Dies betrifft in diesem Anwendungsfall in erster Linie die Aufgaben der Fertigungssteuerung. Es wurde für alle Leitlinien geprüft, ob sie für das Fallbeispiel anwendbar sind. Anschließend wurde das Wertstromdesign grafisch abgebildet

##### **Leitlinie 1: Bestimmen Sie verlässliche Termine für ihre Aufträge**

Das im Unternehmen vorhandene ERP-System ermittelt bereits ausgehend von einem Kundenwunschtermin in einer Rückwärtsterminierung die Start- und Vorgangstermine der Aufträge. Auf eine Aktualisierung des Betriebskalenders ist in erhöhtem Maße zu achten.

##### **Leitlinie 2: Kontrollieren Sie den Zugang zur Fertigung durch eine Conwip-Steuerung**

Die Einführung einer Conwip-Steuerung stellt auch in diesem Fall eine gute Möglichkeit zur Bestandsreduzierung dar. Eine kartenbasierte Lösung ist in diesem Unternehmen umsetzbar. Bei der Auslegung der Conwip-Steuerung ist die Kartenanzahl mit der Plan-Durchlaufzeit der Arbeitssysteme abzustimmen. In diesem Fall wurde aus dem Quotienten aus arbeitssystemspezifischen Plan-Durchlaufzeiten und der Plan-Leistungen die Anzahl der Karten festgelegt.

##### **Leitlinie 3: Berücksichtigen Sie die Dringlichkeit eines Auftrags bei der Reihenfolgebildung**

In diesem Beispiel werden die Plan-Vorgangstermine bereits genutzt, um die Aufträge an den Arbeitssystemen zu priorisieren. Wie im Ist-Wertstrom ist daher auch die Vorgabe für die Reihenfolgebildung im Soll-Wertstrom durch das Symbol *Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin* gekennzeichnet. Die Umsetzung erfolgt in der Fertigung jedoch nicht durchgängig und sollte an allen Arbeitssystemen durch Hilfsmittel unterstützt werden.

##### **Leitlinie 4: Kommunizieren Sie den Plan-Abgang an alle Arbeitssysteme**

Die Plan-Abgänge der einzelnen Arbeitssysteme sind mit der Terminierung von Aufträgen bekannt und können daher an die Arbeitssysteme kommuniziert werden. Da die Fertigung relativ weitläufig ist, sollten die einzelnen Werkstätten individuell über ihren Plan-Abgang informiert werden.

**Leitlinie 5: Beseitigen Sie Rückstände an den Arbeitssystemen durch eine systematische Rückstandsregelung**

Das Unternehmen weist eine ausreichende Kapazitätsflexibilität auf, um eine systematische Rückstandsregelung anzuwenden. Vor allem der hohe Qualifikationsgrad der Mitarbeiter kann genutzt werden, um bei einer zuverlässigen Rückstandsmessung Mitarbeiter verstärkt als Springer an rückständigen Arbeitssystemen einzusetzen. Ziel sollte es auch in diesem Fall sein, Terminabweichungen, die größer als ein Betriebskalendertag sind, zu vermeiden.

Da das Wertstromdesign für Auftragsfertiger keine physischen Umstellungen in der Fertigung vornimmt, ist der Materialfluss im Soll-Zustand identisch zum Ist-Zustand (Abb. 7-15). Der Soll-Zustand enthält jedoch die neugestalteten Informationsflüsse zur Fertigungssteuerung und liefert Zielvorgaben für die logistischen Zielgrößen.

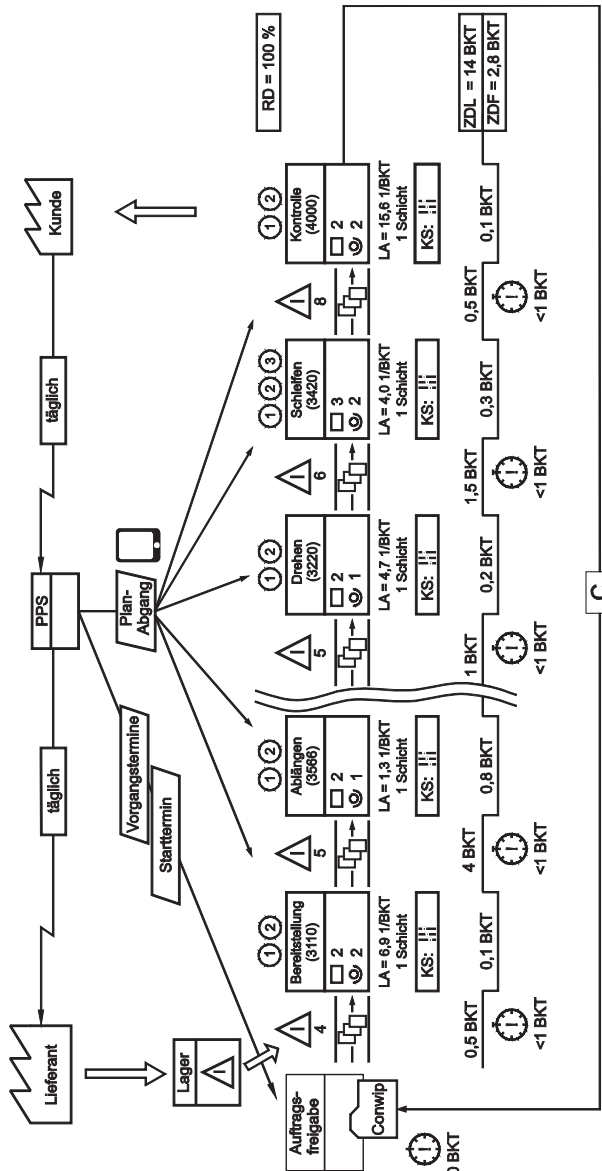


Abb. 7-15: Darstellung des Soll-Zustands der Fertigung

ZDF : Durchführungszeit    ZDL: Durchlaufzeit    RD: Reihenfolgeisziplin    KS: Kapazitätssteuerung    LA: mittlere Leistung in Anzahl Aufträge pro BKT  
 111 : Reihenfolgebildung nach Termin    C : Terminabweichung    □ : Conwip-Steuerung    △ : Anzahl Arbeitsplätze    111 : Rückstandsregelung

#### **7.4.5 Kritische Würdigung des Fallbeispiels**

Im zweiten Anwendungsbeispiel ist es ebenfalls gelungen, die Wertstrommethode in der Werkstattfertigung eines Auftragsfertigers anzuwenden.

Die Wertstromanalyse führt in einem eintägigen Workshop zu einer guten Transparenz über das logistische Zielsystem des Unternehmens. Insbesondere die Kapazitätssteuerung und Auftragsfreigabe konnten als maßgebliche Schwachstellen identifiziert werden. Da Rückstände in der Fertigung nicht systematisch beseitigt werden, kumulieren sich diese und führen zu hohen Terminabweichungen im Abgang (14,1 BKT). Die Auftragsfreigabe nach Termin führt bei Störungen zu einem hohen Bestandsniveau der Fertigung. Die Bestandsreichweite beträgt an einzelnen Arbeitssystemen bis zu 8 BKT. Die ausgewählte Fertigungsfamilie besitzt bei einer Gesamtdurchführungszeit von 3 BKT eine Durchlaufzeit von über 34 BKT.

Der Vergleich der erhobenen Kennzahlen mit Rückmeldedaten gelingt in diesem Fall vollständig. Die mittlere Terminabweichung kann in der Wertstromanalyse zwar nicht für das letzte, jedoch für das vorletzte Arbeitssystem geschätzt werden. Die Schätzung stimmt recht genau mit dem gemessenen Wert aus Rückmeldedaten überein. Auch ein Vergleich von Bestand und Reihenfolgedisziplin ist möglich. Die Reihenfolgedisziplin wird in der Wertstromanalyse, bedingt durch die Systematik der Erhebung, zwar überschätzt, gibt jedoch in der Tendenz wieder, dass die vorgegebene Reihenfolgeregel zumindest nicht konsequent umgesetzt wird. Der Bestandswert aus der Wertstromanalyse ist auch in diesem Fall ein verlässlicher Repräsentant, da der Auftragsbestand auf Fertigungsebene nur moderat schwankt.

Alle Elemente des Wertstromdesigns können in diesem Beispiel angewendet werden und hätten entsprechend einen positiven Einfluss auf die logistischen Zielgrößen der Fertigung.

## 8 Schlussbetrachtung

Dieses Kapitel fasst zunächst in Abschnitt 8.1 die Ergebnisse der einzelnen Kapitel und der Gesamtmethodik zusammen. Abschließend gibt Abschnitt 8.2 einen Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Methode.

### 8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt zunächst den Forschungsbedarf für eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger heraus (Kapitel 2). Dazu werden die Besonderheiten einer Auftragsfertigung genannt und deren logistisches Zielsystem erläutert. Ausgehend von den Defiziten bestehender Ansätze definiert das Kapitel schließlich Anforderungen an eine Wertstrommethode für Auftragsfertiger, die alle relevanten logistischen Zielgrößen und deren Einflussgrößen aufnehmen kann und diese systematisch beeinflusst.

Ein wesentlicher Bestandteil der Methode ist die Wertstromanalyse für Auftragsfertiger (Kapitel 3). Sie dient dazu, in einer Auftragsfertigung die Material- und Informationsflüsse aufzunehmen und Handlungsfelder zu identifizieren. Ein vierstufiges und für Auftragsfertiger allgemeingültiges Vorgehen leitet den Anwender bei der Durchführung der Analyse und deckt Schwachstellen im Produktionssystem auf. Eine Software-Lösung für die Datenaufnahme und ein Standardbogen zur Erstellung der Wertstromkarte unterstützen den Anwender und reduzieren den Aufwand der Analyse.

Die Konfiguration des Wertstromdesigns für Auftragsfertiger (Kapitel 4) bestimmt für alle Aufgaben der Fertigungssteuerung spezifische Methoden, welche jeweils die Besonderheiten der Auftragsfertigung berücksichtigen und das logistische Zielsystem einer Auftragsfertigung unterstützen. Die Methoden sind in einem sehr breiten Spektrum von Fertigungstypen anwendbar und zeichnen sich durch einen geringen Aufwand aus.

Die Evaluation der Konfiguration (Kapitel 5) stellt sicher, dass die Methoden in ihrem Zusammenspiel die logistischen Zielgrößen einer Auftragsfertigung effektiv unterstützen. Das hierzu erstellte Simulationsmodell eines Auftragsfertigers mit Werkstattfertigung belegt die Wirksamkeit der zuvor festgelegten Methoden. Es zeigt sich, dass die Kundenaufträge durch eine Reihenfolgebildung nach Plan-Termin und durch eine Rückstandsregelung mit einer hohen Termintreue fertiggestellt werden können. Eine Conwip-Steuerung hält zudem durch ein sehr einfaches Wirkprinzip Bestände und Durchlaufzeiten gering.

Das evaluierte Wertstromdesign wird anschließend in verständliche Gestaltungsleitlinien umformuliert (Kapitel 6), die den Methodenanwender bei der Erstellung eines Soll-Zustands der Material- und Informationsflüsse unterstützen. Hinweise zur Umsetzung der

Leitlinien und praktische Hilfsmittel stellen sicher, dass die Methoden auch in der Praxis ohne externe Berater etabliert werden können.

Die Erprobung des Verfahrens in zwei Industriebetrieben (Kapitel 7) belegt, dass sich die Wertstrommethode für Auftragsfertiger für die komplexe betriebliche Praxis eignet. Die Wertstromanalyse führt zu einer hohen Transparenz über die logistischen Zielgrößen einer Auftragsfertigung und zeigt zudem bei einer mangelhaften Zieleinhaltung Ursachen dafür auf. Die Gestaltung eines Soll-Wertstroms ist in beiden Fällen gelungen. Es ist daher möglich, Auftragsfertiger in einem Schnellverfahren bei der Verbesserung ihrer logistischen Zielgrößen zu unterstützen.

### 8.2 Ausblick

Mit der entwickelten Gesamtmethodik können produzierende Unternehmen ihre Fertigung in einem eintägigen Workshop analysieren und Verbesserungsmaßnahmen einleiten. Die Betrachtung der Termintreue und ihrer Einflussgrößen in der Fertigung ist ein Alleinstellungsmerkmal dieser Methode. Für die Weiterentwicklung der Methode sind drei Themen von besonderem Interesse: die Erweiterung der im Fertigungsrundgang aufgenommenen Größen, die Weiterentwicklung der Wertstrom-Applikation für mobile Endgeräte sowie die Spezialisierung des Methodenkatalogs des Wertstromdesigns für verschiedene Anwendungsfälle.

Die Analyse ist in ihrer derzeitigen Form auf die Aufnahme logistischer Zielgrößen ausgelegt. Für Unternehmen an Hochlohnstandorten sind jedoch neben den zeitlichen Größen auch die Kosten- und Qualitätsfaktoren von Bedeutung. Die Wertstromanalyse kann daher derart weiterentwickelt werden, dass Mitarbeiter- und Maschinenproduktivität simultan aufgenommen werden. So könnte der Fertigungsrundgang derart ausgeweitet werden, dass bspw. in einer Multimomentanalyse Mitarbeiter- und Maschinenzustände aufgenommen und ausgewertet werden.

Die Applikation zur Unterstützung der Datenaufnahme in der Produktion kann an verschiedenen Stellen weiterentwickelt werden. Besonders sinnvoll erscheint die Erstellung einer Wertstromkarte. Dafür können bspw. die entsprechenden Arbeitssysteme in der Applikation manuell ausgewählt und anschließend als Wertstromdarstellung in einem kompatiblen Dateiformat (bspw. als PDF) ausgegeben werden.

Das Wertstromdesign bietet in seiner aktuellen Form für jede Aufgabe der Fertigungssteuerung ein konkretes Verfahren an. Diese besitzen zwar einen breiten Anwendungsbereich, führen aber nicht in jeder Fertigung zu den besten Ergebnissen. Es könnte daher ein vollständiger Methodenkatalog bestehen, aus dem je nach Fertigungstyp die passenden

## Schlussbetrachtung

---

Methoden ausgewählt werden können. Dies setzt einen Konfigurationsalgorithmus voraus, der je nach Gegebenheit der Produktion die passende Methode auswählt.



## Literaturverzeichnis

- Balc98 Balci, O.: Verification, Validation and Testing. In: In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of Simulation. John Wiley & Sons, New York et al., S. 335-393, 1998.
- Balz09 Balzert, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik - Basiskonzepte und Requirements Engineering. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 2009.
- Bege05 Begemann, C.: Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung. Diss. Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 2, 2005.
- Brag06 Braglia, M.; Carmignani, G.; Zammori, F.: A new value stream mapping approach for complex production systems. International Journal of Production Research, 44:18-19, S. 3929-3952, 2006.
- Brei01 Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Diss. Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 571, Düsseldorf, 2001.
- Chit07 Chitturi, R.M.; Glew, D.J.; Paulls, A.: Value stream mapping in a jobshop. International Conference on Agile Manufacturing, Durham, 2007.
- Conw67 Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.: Theory of Scheduling. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1967.
- Domb88 Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Diss. Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 159, Düsseldorf, 1988.
- Doms97 Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 1997.
- Erla07 Erlach, K.: Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 2007.
- FIR13 Forschungsinstitut für Rationalisierung: Untersuchung 2013 „Produktion am Standort Deutschland“ - Management Summary. Aachen, 2013
- Gold84 Goldratt, E.M.: The goal: excellence in manufacturing. North River Press, Croton-on-Hudson (NY), 1984.

- Grew08 Grewal, C.: An initiative to implement lean manufacturing using value stream mapping in a small company. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 15(3/4), 404-417, 2008.
- Habe12 Haberfellner, R.: *Systems Engineering - Grundlagen und Anwendungen*. 12. Auflage, Orell Füssli, Zürich, 2012.
- Hämm10 Hämmerle, M.; Rally, P.: *Fertigung nach Maß - Wertstrom-Engineering für effiziente Produktionsprozesse. Qualität und Zuverlässigkeit*, Vol. 50, S. 64-65, 2010.
- Hopp08 Hopp, W.J.; Spearman M.L.: *Factory physics*. McGraw-Hill / Irwin, Boston, 2008
- Jone03 Jones, D.; Womack; J.: *Seeing the Whole. Mapping the Extended Value Stream*. Lean Enterprise Institute, Cambridge, 2003.
- Khas01 Khaswala, Z.N.; Irani, S.: *Value Network Mapping: Visualization and Analysis of Multiple Flows in Value Stream Maps*. Proceedings of the Lean Management Solutions Conference, St. Louis, 2001.
- Klet07 Kletti, J.: *Konzeption und Einführung von MES-Systemen*. Springer, Berlin, Heidelberg [u.a.], 2007.
- Koch15 Koch, C.; Trzyna, D.; Lödding, H.; Mehlhart, A.: *Fertigungssteuerung in der variantenreichen Auftragsfertigung*. *ProductivITy*, 2/2015, S. 36-38, 2015.
- Krob13 Krobath, P.: *Mit Kapazitätssteuerung zur termintreuen Produktion*. *ProductivITy*, 2(2013), S. 35-37, 2013.
- Kuyu13 Kuyumcu, A.: *Modellierung der Termintreue in der Produktion*. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2013.
- Lee14 Lee, Y.-U.: *Wertstromdesign als Instrument der wertorientierten Unternehmensführung*. Diss. HHL Leipzig Graduate School of Management, Leipzig, 2014.
- Like08 Liker, J. K.; Meier, D.: *Der Toyota Weg*. 5. Auflage, FinanzBuch Verlag, München, 2008.
- Like09 Liker, J. K.; Meier, D.: *Der Toyota Weg – Praxisbuch*. 3. Auflage, FinanzBuch Verlag, München, 2009.

- Lödd01 Lödding, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Diss. Universität Hannover, veröffentlicht in: VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Nr. 587, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- Lödd12 Lödding, H.; Nyhuis, P.; Schmidt, M.; Kuyumcu, A.: Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. Production Planning & Control: The Management of Operations. 2012, S. 1-14.
- Lödd16 Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 2016.
- Lödd17 Lödding, H.; Piontek, A.: The surprising effectiveness of earliest operation due-date sequencing. Production Planning & Control, 2017.
- Lucz98 Luczak, H.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 1998.
- Nyhu91 Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Diss. Universität Hannover 1991, veröffentlicht in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 225, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- Nyhu12 Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- Pete96 Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Diss. Universität Hannover 1995, veröffentlicht in: Fortschr.-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 193, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- Rabe08 Rabe, M.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 2008.
- Roth04 Rother, M.; Shook, J.: Sehen Lernen – mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Lean Management Institut, Mülheim an der Ruhr, 2004.
- Roth05 Rother, M.: Value-Stream Mapping in a Make-to-Order Environment. Lean Enterprise Institut, 2005.
- Schu14 Schuh, G.; Schmidt, C.: Produktionsmanagement – Handbuch Produktion und Management 5. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [u.a.], 2014.

- Spat10 Spath, D. (Hrsg.); Hämmerle; Rally, P.: Wertschöpfung steigern. Ergebnisse der Datenerhebung über die Verbreitung und Ausgestaltung von Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion mit besonderem Fokus auf die Wertstrommethode. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2010.
- Stam08 Stamm, M.L.; Neitzert, T.: Value stream mapping in a manufacture-to-order small and medium enterprise. 3rd World Conference on Production and Operations Management (POM), Tokyo, 2008.
- Suri98 Suri, R.: Quick response manufacturing - a companywide approach to reducing lead times. Productivity Press, Portland, 1998.
- Take13 Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem. 7. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2013.
- Thom15 Thomassen, M.K.; Alfnes, E.; Gran, E.: A new Value Stream Mapping Approach for Engineer-to-Order Production Systems. Advances in Production Management Systems, Tokyo, 2015.
- Thür12 Thürier, M.; Stevenson, M.; Silva, C.; Land, M.J.; Fredendall, L.D.: Workload Control and Order Release: A Lean Solution for Make-to-Order Companies. Production and Operations Management, Vol. 21-5, S. 939-953, 2012.
- VDI18 VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2018.
- VDMA14 VDMA, McKinsey & Company: Zukunftsperspektiven deutscher Maschinenbau. Studie, Frankfurt/Main, Berlin, 2014.
- Voll04 Vollmer, L.; Schlörke, S.: Variantenwertströme als Navigator für die Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik online, 4(94), S. 128-131, 2004.
- Weih01 Weihrauch, K.; Keller, G.: Produktionsplanung und -steuerung. Einführung in die diskrete Fertigung und Serienfertigung mit SAP® PP. Galileo Press GmbH, Bonn, 2001.
- Wein88 Wein, L.M.: Scheduling in Semiconductor Wafer Fabrication. IEEE Transactions of Semiconductor Manufacturing, 1(3), S: 115-130, 1988.
- Wien97 Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Hanser, München, 1997.





















- Wien08      Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008.
- Wien11      Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement in der Produktion - Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2011
- Yu01        Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Diss. Universität Hannover 2001, veröffentlicht in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 576, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.



# Anhang

## Anhang A: Elemente der Wertstrommethode

Symbol	Beschreibung	Gruppe
	Produktionsplanung und -steuerung	Prozesse
	Auftragspool	
	Arbeitssystem	
	Kunde / Zulieferer	Externe Quellen
	Anzahl der Arbeitsplätze	Arbeitssystem
	Anzahl der Mitarbeiter	
	Manueller Informationsfluss	Informationsfluss
	Elektronischer Informationsfluss	
	Plan-Abgang	Planungsinformationen
	Plan-Starttermin Auftrag	
	Plan-Endtermin Vorgang	
	Transfer von Rohmaterialien und Fertigwaren	Materialfluss
	Push-Bewegungen	
	FIFO	Reihenfolgebildung
	nach Termin	
	rüstoptimierend	
	nach Auftragsart (Kunde, Lager)	
	Sonstige	

Symbol	Beschreibung	Gruppe
	Rückstandsregelung	Kapazitätssteuerung
	Undefiniert	
	Sonstige	
	Freigabe nach Termin	Auftragsfreigabe
	Conwip-Steuerung	
	Engpasssteuerung	
	Sonstige	
	Begleitkarte Conwip-Steuerung	Freigabekarten
	Begleitkarte Engpasssteuerung	
	Gesamtbestand	Bestand
	in Bearbeitung	
	Stellplatz des Arbeitssystems	
	Zwischenlager	
	Transporter	
	Stellplatz des Vorgängerarbeitssystems	
	Auftrag mit Plan-Rang	
	Durchlaufzeit	Zeitgrößen
	Durchführungszeit	
	verfrüht	Terminabweichung
	verspätet	

## Anhang B: Ergebnisse der Fallbeispiele

### Ergebnisse der Datenaufnahme von Fallbeispiel 1

Arbeits-system	Bestand [-]	Durch-laufzeit [BKT]	Durchfö-hrungszeit [BKT]	Planrang der Aufträge i.B. [-]	Termin-abwei-chung [BKT]
Außenschleifen	45	17,3	0,4	33; 40	21,7
Außendurch-gangsschleifen	10	2,4	0,5	3; 6	0,7
Außenrund-schleifen	10	7,1	0,7	6	18,1
CNC-Feindre-hen	14	20,0	1,4	11	27,5
Durchgangs-schleifen	-	-	-	-	-
Honen	1	10,0	1,4-	1	12,0
Innenschleifen (Automatisch)	54	24,5	0,5	15; 18; 27; 29; 35; 49	28,3
Innenschleifen (Manuell 1)	64	12,8	0,2	4; 34; 43; 51; 53	35,9
Innenschleifen (Manuell 2)	13	6,5	0,8	5, 13	5,3
Kontrolle	47	3,0	0,1	15; 18; 23; 29; 34	13,5
Planschleifen	7	3,5	0,6	2	50,8

## Ergebnisse der Datenaufnahme von Fallbeispiel 2

Arbeits-system	Bestand [-]	Durchlauf-zeit [BKT]	Durchföhrungszeit [BKT]	Planrang der Aufträge i.B. [-]	Terminab-weichung [BKT]
3110	56	8,1	0,1	11, 13	9,4
3220	27	5,7	0,2	1, 5	9,5
3227	9	30,0	3,3	1	2,4
3231	1	1,0	1,0	1	-1,5
3232	5	7,1	1,4	3	15,0
3260	14	3,6	0,3	1	8,1
3270	1	1,0	1,0	1	3,5
3281	2	2,5	1,3	1	0,3
3290	5	4,2	0,8	1, 2	9,3
3310	6	2,2	0,4		3,1
3337	1	10,0	10,0	1	23,0
3339	2	20,0	10,0	1	18,5
3356	1	10,0	10,0	1	19,0
3410	7	1,7	0,2	2, 3	7,5
3420	17	4,3	0,3	9, 11, 12	14,1
3436	1	3,3	3,3	1	22,7
3450	1	1,7	1,7	1	8,8
3520	10	10,0	1,0	3, 4	22,5
3550	20	4,9	0,2	14	27,4
3566	8	6,2	0,8	1, 2	8,0
3567	5	8,3	1,7	1, 3, 4	11,8
3568	9	6,9	0,8	-	12,6
3812	7	5,8	0,8	-	13,6
3814	1	1,0	1,0	1	9,5
3821	0	0,0	0,2	-	0,0
3832	0	0,0	0,2	-	0,0
3964	4	1,6	0,1	-	1,6
3975	16	1,8	0,2	1, 2	12,9
4000	1	0,1	0,1	1	8,0

## Lebenslauf

<b>Name</b>	Koch
<b>Vorname</b>	Christoph
<b>Geburtsdatum</b>	28.06.1984
<b>Geburtsort</b>	Nürnberg
<b>08.1991 - 07.1992</b>	Martin-Luther-King-Schule in Nürnberg
<b>08.1992 - 07.1995</b>	Grundschule Eidinghausen in Bad Oeynhausen
<b>08.1995 - 06.2004</b>	Immanuel-Kant-Gymnasium in Bad Oeynhausen
<b>10.2005 - 07.2011</b>	Studium des Maschinenbaus Leibniz Universität Hannover Abschluss: Diplom-Ingenieur
<b>09.2011 - 12.2012</b>	Internationaler Produktionsplaner Phoenix Contact GmbH & Co. KG
<b>01.2013 - 12.2016</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik Technische Universität Hamburg-Harburg
<b>04.2017 - heute</b>	Consultant <i>Lean Production</i> Siemens Healthcare GmbH

## Schriftenreihe

### **Band 1**

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

### **Band 2**

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

### **Band 3**

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

### **Band 4**

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

### **Band 5**

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

### **Band 6**

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

### **Band 7**

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

### **Band 8**

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

### **Band 9**

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

### **Band 10**

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

**Band 11**

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

**Band 12**

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

**Band 13**

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

**Band 14**

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

**Band 15**

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

**Band 16**

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

**Band 17**

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

**Band 18**

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

**Band 19**

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

**Band 20**

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

**Band 21**

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

**Band 22**

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

**Band 23**

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

**Band 24**

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

**Band 25**

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

**Band 26**

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

**Band 27**

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

**Band 28**

Griefahn, Dominik M.: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

**Band 29**

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

**Band 30**

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

**Band 31**

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

**Band 32**

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

**Band 33**

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

**Band 34**

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

**Band 35**

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

**Band 36**

Brügmann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

**Band 37**

Benter, Martin: Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

**Band 38**

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.