

## Roman Ungern-Sternberg

»Analyse der Dispositionskomplexität in der wertstromorientierten Variantenfertigung«





**Roman Ungern-Sternberg**

»Analyse der Dispositionskomplexität in der  
wertstromorientierten Variantenfertigung«

**Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup> Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup> Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup> Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-1100  
info@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

**D 93**

2023

**Druck und Weiterverarbeitung:**

Fraunhofer Verlag Mediendienstleistungen, Stuttgart, 2023  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet, unter folgender Creative-Commons-Lizenz:  
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen  
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

# **Analyse der Dispositionskomplexität in der wertstromorientierten Variantenfertigung**

Analysis of scheduling complexity in value stream oriented variety production

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von**

**Roman Ettore Ungern-Sternberg**

**aus Lindau (Bodensee)**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 2023

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2023



# Danksagung

Mit der saloppen Frage eines Kunden, weshalb in dieser Produktion denn alles so komplex sei und der Bitte, das einmal verständlich darzustellen, begann die Forschungsreise für diese Dissertation. Heute liegt das Ergebnis, zumindest für die Analyse der Dispositions-komplexität, vor. Möglich wurde dies nur durch vielfältige Unterstützung.

Maßgeblich beigetragen zum Erfolg der Arbeit hat das anregende Arbeitsumfeld am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. Herrn Professor Thomas Bauernhansl danke ich für die gewährten Freiheiten und die wohlwollende Unterstützung der Arbeit. Bei Herrn Professor Hermann Lödding, dem Zweitgutachter der Arbeit, bedanke ich mich für die intensive Diskussion und die wertvollen Hinweise. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanke ich mich bei Professor Verl.

Besonderer Dank gilt meinen beiden wissenschaftlichen Betreuern. Sie hatten maßgeblichen Einfluss auf Ergebnis und Qualität der Arbeit. Herr Dr. Klaus Erlach hat den Erkenntnisgewinn mit wertstrom- und systemtheoretischen Grundlagen kontinuierlich unterstützt und stets die richtigen Fragen gestellt. Herr Dr. Hans-Hermann Wiendahl hat in unzähligen gemeinsamen Diskussionen mein produktionslogistisches Verständnis geprägt und unermüdlich sprachliche und inhaltliche Verbesserungen beigetragen.

Herrn Michael Lickefett und den Kollegen und Kolleginnen in der Abteilung für Fabrikplanung und Produktionsmanagement danke ich für das kollegiale und motivierende Umfeld. An den Projekten wächst nicht nur die Promotion, sondern vor allem man selbst.

Meinen Freunden danke ich für die Motivation zur Promotion und die notwendige Ablenkung davon. Für die inhaltliche und moralische Unterstützung nicht nur beim Schreiben der Arbeit danke ich vor allem Christoph Leipoldt, Pia Mozer und Alicia Schrezenmeier.

Meinen Eltern Barbara und Ettore Ungern-Sternberg danke ich für die uneingeschränkte Unterstützung und den Rückhalt auf allen Schritten meines Weges. Besonders bedanke ich mich bei meinem Großvater Hermann Peter, der seit jeher mein Vorbild für Bildung und Toleranz ist. Ihnen allen ist die Arbeit gewidmet.





# Kurzfassung

In Produkt-Produktionssystemen bedingen sich Systemstruktur und -verhalten gegenseitig. Die vorherrschende Vielfalt und Dynamik in der Variantenfertigung stellt bestehende, für die Serienfertigung entwickelte Verfahren wie die Wertstromanalyse vor methodische Herausforderungen.

In der Arbeit wird eine Methode zur Analyse der internen Dispositionskomplexität in der wertstromorientierten Variantenfertigung entwickelt. Theoretische Grundlage der Methode ist die Systemtheorie. Das Grundmodell zur detaillierten Beschreibung von Struktur und Verhalten basiert auf den drei zentralen Klassen Artikel, Auftrag und Arbeitssystem sowie bekannten logistischen Theorien.

Die zielgerichtete und systematische Analyse orientiert sich an günstigen Systemeigenschaften, welche aus bestehenden Gestaltungsansätzen synthetisiert wurden. Mit Hilfe des iterativen Vorgehens lässt sich der Erfüllungsgrad der jeweiligen Eigenschaften ermitteln. Die Priorisierung möglicher Abweichungen erfolgt engpassorientiert anhand von fünf Engpassarten.

Die zwei aufeinander aufbauenden Visualisierungen Produktnetz und Wertstrom dienen der Kommunikation und übersichtlichen Darstellung der Analyseergebnisse. Schwerpunkte der Analyse bilden die beiden logistischen Zieldimensionen Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit. Die quantitative Analyse der Dispositionskomplexität erfolgt schrittweise in insgesamt zehn, auf bekannten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen aufbauenden Einzelanalysen.

Die innere Konsistenz wird anhand der entwickelten zwölf günstigen Systemeigenschaften geprüft. Zudem wird die Methode anhand unabhängiger Anforderungen an Methoden zur Komplexitätsbewältigung geprüft. Die Methode erfüllt diese im Bereich der quantitativen Analyse vollumfänglich. Das abschließende Fallbeispiel aus der Fahrzeugzulieferindustrie zeigt die Praxistauglichkeit der Methode für eine wertstromorientierte Variantenfertigung.



# Abstract

In product production systems, system structure and behavior are mutually dependent. The prevailing diversity and dynamics in variety production pose methodological challenges to existing methods developed for mass production, such as value stream mapping.

The thesis develops a method for the analysis of the internal scheduling complexity in value stream-oriented variant production. The theoretical basis of the method is system theory. The basic model for the detailed description of structure and behavior is based on the three main classes article, order, and work system as well as known logistic theories.

The goal-oriented and systematic analysis is based on favorable system characteristics, which were synthesized from existing design approaches. With the help of the iterative procedure, the degree of fulfillment of the respective characteristic can be determined. The prioritization of possible deviations focuses on system constraints based on five bottleneck types.

The two interlinked visualizations of the product network and value stream serve to communicate and clearly present the analysis' results. The analysis focuses on the two logistical dimensions reliability and speed. The quantitative analysis of the disposition complexity is carried out in ten individual analyses based on known cause-effect relationships.

The internal verification is based on the developed twelve favorable system characteristics. For external verification, the method is tested against independent requirements for methods focusing on complexity management. The method fully satisfies the requirements in the area of quantitative analysis. The final case study from the automotive supply industry shows the practical suitability of the method for value stream-oriented variety production.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>17</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>19</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>23</b>
1.1 Ausgangssituation.....	23
1.2 Problemstellung .....	25
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage.....	28
1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung .....	29
1.5 Aufbau der Arbeit .....	33
<b>2 Wertstromorientierte Variantenfertigung als System.....</b>	<b>35</b>
2.1 Wertstromorientierte Variantenfertigung .....	35
2.1.1 Produkt-Produktionssystem als Unternehmensteil .....	35
2.1.2 Merkmale der wertstromorientierten Variantenfertigung .....	37
2.1.3 Zugrundeliegendes Zielsystem und Zielpriorisierung .....	42
2.2 Relevante Grundlagen der Systemtheorie.....	46
2.2.1 Systembegriff und Aspekte eines Systems .....	46
2.2.2 Beschreibung der Systemstruktur.....	48
2.2.3 Beschreibung des Systemverhaltens .....	50
2.2.4 Besonderheiten komplexer adaptiver Systeme.....	54
2.3 Systems Engineering als Methode der Systemgestaltung .....	57
2.3.1 Paradigmen der Systemgestaltung .....	57
2.3.2 Vorgehensmodell des Systems Engineering.....	59
2.3.3 Ausgewählte Methoden der Systemgestaltung .....	61
2.4 Techniken der quantitativen Analyse.....	63
2.4.1 Heuristische Beschreibungs- und Erklärungsmodelle.....	63
2.4.2 Modellierung der Systemstruktur .....	65
2.4.3 Modellierung des Systemverhaltens .....	67
2.4.4 Visualisierung von Systemstruktur und -verhalten.....	69

---

2.5	Ordnungsrahmen der Arbeit .....	71
<b>3</b>	<b>Grundmodell der wertstromorientierten Variantenfertigung.....</b>	<b>75</b>
3.1	Grundlagen der datenbasierten Wertstromanalyse .....	75
3.1.1	Grundmodell der Wertstromanalyse .....	76
3.1.2	Grenzen der Wertstromanalyse in der Variantenfertigung.....	78
3.2	Erweiterte Strukturbeschreibung .....	80
3.2.1	Artikel .....	81
3.2.2	Auftrag.....	83
3.2.3	Arbeitssystem .....	85
3.2.4	Produktionssegment und -modul .....	91
3.3	Erweiterte Verhaltensbeschreibung und -erklärung.....	94
3.3.1	Kennzahlen logistischer Lieferketten.....	94
3.3.2	Trichtermodell und logistische Kennlinien .....	96
3.3.3	Wirkzusammenhänge der Fertigungssteuerung .....	99
3.3.4	Kontinuierliche Systementwicklung .....	103
3.4	Zwischenfazit und Handlungsbedarf .....	105
<b>4</b>	<b>Bestehende Ansätze zur Analyse der Dispositionskomplexität .....</b>	<b>107</b>
4.1	Anforderungen an bestehende Analyseansätze .....	107
4.2	Bewertung relevanter Analyseansätze .....	109
4.2.1	Strukturorientierte Analyseansätze .....	109
4.2.2	Verhaltensorientierte Analyseansätze .....	114
4.3	Kritische Würdigung und Forschungsbedarf .....	117
<b>5</b>	<b>Methode zur Analyse der Dispositionskomplexität .....</b>	<b>121</b>
5.1	Lösungsansatz .....	121
5.2	Günstige Systemeigenschaften wertstromorientierter Variantenfertiger .....	124
5.2.1	Zusammenfassung bestehender Ansätze und Fehlerkreise .....	125
5.2.2	Synthese günstiger Systemeigenschaften.....	128
5.3	Relevante dispositive Engpassarten.....	138
5.3.1	Kapazitätsengpass .....	140

---

5.3.2	Terminengpass .....	142
5.3.3	Komplettierer (Auftragsverfügbarkeitsengpass) .....	143
5.3.4	Mix-Flexibilitätsengpass .....	145
5.3.5	Lagerfehlteil (Lagerverfügbarkeitsengpass) .....	146
5.4	Systemgliederung .....	148
5.4.1	Segmentbildung .....	148
5.4.2	Modulbildung .....	150
5.5	Visualisierung des Systems .....	152
5.5.1	Produktnetz .....	153
5.5.2	Wertstrom .....	162
<b>6</b>	<b>Vorgehen zur Analyse der Dispositionskomplexität .....</b>	<b>171</b>
6.1	Überblick und Zusammenhänge der Einzelanalysen .....	171
6.2	Analyse der Systemstruktur .....	174
6.2.1	Ausfallrisiko .....	175
6.2.2	Vernetzung .....	176
6.3	Analyse des Systemverhaltens aus Kundensicht .....	177
6.3.1	Liefertreue .....	178
6.3.2	Lieferzeit .....	179
6.4	Analyse des Systemverhaltens aus Dispositionssicht .....	182
6.4.1	Terminabweichung .....	183
6.4.2	Auftragsdurchlaufzeit .....	185
6.4.3	Arbeitsrückstand .....	186
6.4.4	Arbeitssystemdurchlaufzeit .....	189
6.4.5	Servicegrad .....	191
6.4.6	Lagerverweilzeit .....	194
6.5	Kennzahlenanalyse .....	196
6.6	Ursachenkonsolidierung .....	201
<b>7</b>	<b>Theoretische und empirische Prüfung .....</b>	<b>203</b>
7.1	Prüfung der inneren Konsistenz (interne Verifikation) .....	204

---

7.2	Prüfung anhand unabhängiger Anforderungen (externe Verifikation) .....	206
7.3	Fallbeispiel aus der Fahrzeugindustrie „Zulieferer AG“ (Validierung) .....	207
7.3.1	Ausgangssituation und Problemstellung .....	208
7.3.2	Gliederung und Strukturanalyse der Produktion .....	209
7.3.3	Visualisierung und Analyse im Produktnetz.....	212
7.3.4	Visualisierung und Analyse im Wertstrom.....	216
7.3.5	Ursachenkonsolidierung der Dispositionskomplexität .....	221
7.3.6	Aufwand- und Nutzen-Betrachtung .....	223
<b>8</b>	<b>Abschließende Gesamtbetrachtung .....</b>	<b>225</b>
8.1	Kritische Reflexion .....	225
8.2	Ausblick.....	227
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>229</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>269</b>
A.1	Relevante Ansätze der Systemgestaltung.....	269
A.2	Anforderungskatalog an eine Methode zur Komplexitätsbewältigung .....	277
A.3	Legende der Visualisierungen (Produktnetz und Wertstrom) .....	285



# Abkürzungsverzeichnis

AS	Arbeitssystem
AG	Arbeitsgang
APS	Advanced Planning and Scheduling (System)
AT	Arbeitstag
BDE	Betriebsdatenerfassung
DLZ	Durchlaufzeit
ERP	Enterprise Resource Planning (System)
FIFO	First In – First Out
GE	Geldeinheiten, z.B. Euro
IBCS	International Business Communications Standards
IT	Informationstechnologie
MDE	Maschinendatenerfassung
ME	Mengeneinheit(en), z.B. Stück
MES	Manufacturing Execution System
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
UN	Unternehmen
ZE	Zeiteinheit(en), z.B. Stunden



# Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Wissenschaftliche Positionierung der Arbeit.....	29
Bild 1.2	Phasen angewandter Forschung und Aufbau der Arbeit .....	33
Bild 2.1	Teilsysteme eines Produkt-Produktionssystems.....	37
Bild 2.2	Fokussierung der Arbeit auf Variantenoptimierer .....	39
Bild 2.3	Fokussierung der Arbeit auf wertstromorientierte Variantenfertiger .....	41
Bild 2.4	Rangordnung der Fabrikziele in der schlanken Produktion .....	43
Bild 2.5	Zielsysteme der logistischen Lieferkette.....	45
Bild 2.6	Aspekte eines Systems .....	48
Bild 2.7	Handlungssystem als Regelkreis.....	51
Bild 2.8	Grundprinzipien des Systems Engineering.....	59
Bild 2.9	Systemverständnis der Arbeit.....	64
Bild 2.10	Ausgewählte Diagramme der International Business Communications Standards.....	70
Bild 2.11	Ordnungsrahmen der Arbeit.....	72
Bild 3.1	Exemplarische Wertstromdarstellung .....	77
Bild 3.2	Zentrale Klassen des erweiterten Grundmodells .....	81
Bild 3.3	Exemplarischer Belegungsplan eines Arbeitssystems.....	88
Bild 3.4	Einflüsse auf die Produktionssegmentbildung .....	92
Bild 3.5	Einflüsse auf die Produktionsmodulbildung.....	93
Bild 3.6	Logistische Kennzahlen aus interner Dispositionssicht .....	95
Bild 3.7	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm.....	96
Bild 3.8	Produktions- und Lagerkennlinien .....	97
Bild 3.9	Wirkmodell der Fertigungssteuerung .....	99
Bild 4.1	Durchlaufplan .....	112
Bild 4.2	Bewertung bestehender Ansätze .....	118
Bild 5.1	Lösungsansatz zur Analyse der Dispositionskomplexität .....	122
Bild 5.2	Günstige Eigenschaften wertstromorientierter Variantenfertigungen.....	129
Bild 5.3	Überblick über die untersuchten Engpassarten.....	139

Bild 5.4	Ermittlung des Kapazitätsengpasses .....	141
Bild 5.5	Ermittlung des Terminengpasses .....	143
Bild 5.6	Ermittlung des Komplettierers (Auftragsverfügbarkeitsengpass).....	144
Bild 5.7	Ermittlung des Mix-Flexibilitätsengpasses .....	146
Bild 5.8	Ermittlung des Lagerfehlteils (Lagerverfügbarkeitsengpasses).....	147
Bild 5.9	Segmentbildung (Beispiel Lampenhersteller).....	149
Bild 5.10	Relevante Segmentkennzahlen im Datenkasten (Beispiel Segment 1).....	149
Bild 5.11	Modulbildung (Beispiel Segment 1).....	151
Bild 5.12	Produktnetz – Stufe 1: Komplettierungsstruktur .....	154
Bild 5.13	Produktnetz – Stufe 2: Dispositionsstruktur .....	156
Bild 5.14	Legende der Modulpfeile .....	156
Bild 5.15	Legende der Lagerdarstellung inkl. Dispositionsstrategie.....	157
Bild 5.16	Produktnetz – Stufe 3: Kennzahlen .....	158
Bild 5.17	Legende der Terminabweichungen (Beispiel Verspätung).....	159
Bild 5.18	Legende der Datenkästen der Module und Läger (Beispiel).....	159
Bild 5.19	Legende der Datenbalken .....	160
Bild 5.20	Produktnetz – Stufe 4: Engpasskennzeichnung .....	161
Bild 5.21	Wertstrom – Stufe 1: Modulstruktur .....	163
Bild 5.22	Legende der Arbeitssysteme inkl. Vernetzung .....	164
Bild 5.23	Legende der Pufferdarstellung inkl. Reihenfolgesteuerung.....	165
Bild 5.24	Wertstrom – Stufe 2: Kennzahlen .....	166
Bild 5.25	Legende der Datenkästen der Puffer und Arbeitssysteme (Beispiel).....	167
Bild 5.26	Wertstrom – Stufe 3: Engpasskennzeichnung.....	168
Bild 6.1	Zusammenhänge der Einzelanalysen .....	172
Bild 6.2	Quantifizierung des Ausfallrisikos.....	175
Bild 6.3	Quantifizierung der Vernetzung der Arbeitssysteme .....	176
Bild 6.4	Relevante Einflussgrößen der Liefertreue .....	178
Bild 6.5	Kategorisierung der Wunsch- und Soll-Lieferzeiten.....	180
Bild 6.6	Relevante Einflussgrößen der Lieferzeit.....	182
Bild 6.7	Quantifizierung der Terminabweichung .....	184

---

Bild 6.8	Relevante Einflussgrößen der Terminabweichung (Einzelauftrag).....	185
Bild 6.9	Relevante Einflussgrößen der Auftragsdurchlaufzeit .....	186
Bild 6.10	Quantifizierung des Arbeitsrückstands .....	187
Bild 6.11	Relevante Einflussgrößen des Arbeitsrückstands (Arbeitssystem).....	188
Bild 6.12	Relevante Einflussgrößen der Arbeitssystemdurchlaufzeit .....	190
Bild 6.13	Quantifizierung der Fehlbestandsreichweite und des Servicegrads.....	192
Bild 6.14	Relevante Einflussgrößen des Servicegrades und der Fehlbestandsreichweite .....	193
Bild 6.15	Relevante Einflussgrößen der Lagerverweilzeit .....	195
Bild 6.16	Mikro-Logik der Kennzahlenanalyse .....	197
Bild 6.17	Zeitreihenbasierte Visualisierung und Auswertung von Kennzahlen.....	200
Bild 6.18	Vorgehen zur Ursachenkonsolidierung .....	201
Bild 7.1	Vorgehen zur Prüfung der entwickelten Methode.....	203
Bild 7.2	Einordnung der „Zulieferer AG“ als wertstromorientierte Variantenfertigung.....	208
Bild 7.3	Quantifizierung des Ausfallrisikos (Auszug).....	209
Bild 7.4	Quantifizierung der Vernetzung (Auszug) .....	211
Bild 7.5	Produktnetz des Segments 1 .....	213
Bild 7.6	Wertstrom des Montagemoduls MO .....	217
Bild 7.7	Leistungsanalyse des AS 511 (Montieren) .....	218
Bild 7.8	Erfüllungsgrad der günstigen Systemeigenschaften der „Zulieferer AG“ .....	221



# 1 Einleitung

Die herrschende Komplexität in der mehrstufigen Variantenfertigung stellt bestehende Verfahren zur Analyse der Disposition vor besondere Herausforderungen. Die Ursachen für Abweichungen von den logistischen Zielen liegen in Struktur und Verhalten des aus Produkten und der Produktion selbst bestehenden Systems.

Im einleitenden Kapitel wird zunächst die Relevanz der Komplexitätsbewältigung in einem Produkt-Produktionssystem aufgezeigt und die Problemstellung dargelegt. Ausgehend von dieser Motivation wird die Forschungsfrage formuliert und die Arbeit wissenschaftstheoretisch eingeordnet. Der letzte Abschnitt fasst den Aufbau der Arbeit zusammen.

## 1.1 Ausgangssituation

Der stetige Wettbewerbsdruck und die sich ändernden Kundenanforderungen führen zu einem kontinuierlichen Anpassungsbedarf des angebotenen Produktprogramms und in Folge dessen zu einer Anpassung des Produktionssystems. In der Regel steigt dadurch die Produktvielfalt. Für die Produktion bedeutet das häufig eine Produktion in Losgröße eins. Im Extremfall ist sogar die Produktion in Stückzahl eins beobachtbar. Zudem steigen die Anforderungen der Kunden an die logistische Leistung der Produktion. Dazu zählen insbesondere die Forderungen nach kürzeren Lieferzeiten bei höchster Liefertreue. (Wiendahl et al. 2020, S. 5; Bauernhansl 2017, S. 9–10; Kersten et al. 2017, S. 12–13)

Gerade für ehemals variantenarme Serienfertiger hat dies wesentliche Veränderungen zur Folge: Die gestiegene Varianz ist herzustellen (Economies of Scope), ohne die positiven Skaleneffekte der Serienfertigung zu stark zu beeinträchtigen (Economies of Scale). (Brecher 2011, S. 22; Wildemann 2018, S. 56) Kurze Lieferzeiten lassen sich aufgrund der hohen Variantenzahl nicht mehr effizient durch eine Lieferung ab Lager (make-to-stock) erzielen. Diese durch Kunden verursachten Einflüsse machen häufig eine Änderung der

Produktionskonfiguration, z.B. durch die Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes in Richtung Lieferant, erforderlich. (Wiendahl et al. 2020, S. 246–252; Nywlt 2015, S. 1–3). Die Arbeit bezeichnet ein solches nach den Prinzipien der Wertstrommethode gestaltetes Produktionssystem mit einer großen Vielzahl an Produktvarianten als wertstromorientierte Variantenfertigung. Aufgrund der hohen Komplexität lassen sich die Abläufe zur Disposition (Abwicklung) der Produktionslogistik in einem solchen sozio-technischen Produkt-Produktionssystem beeinflussen, jedoch nicht mehr vollständig beherrschen (Bauernhansl et al. 2014, S. 347; Grossmann 1992, S. 32–33). Eine solche Komplexität ist eine Systemeigenschaft und per se weder gut noch schlecht (vgl. Crawley et al. 2016, S. 306).

Im Rahmen des variety engineering müssen Aufwand und Nutzen der Komplexitätsbeeinflussung bewertet und daraus eine geeignete Konfiguration abgeleitet werden. (Bauernhansl 2017, S. 29; Grossmann 1992, S. 27–31; Jäger et al. 2014, S. 649; Schöllhammer et al. 2015, S. 7; Jäger et al. 2016, S. 116; Beer 1979, S. 39) 30–40% der entstehenden Komplexitätskosten lassen sich der Produktion zuordnen, wobei auch Faktoren außerhalb des üblichen Gestaltungsbereichs der Produktion Einfluss auf die Produktionskomplexität und somit auf die logistische Zielerreichung haben. (Wiendahl et al. 2020, S. 246–252; Erlach 2020, S. 15; Wildemann 2018, S. 6–8; Nußbaum 2011, S. 109) Zu den produktionsexternen Faktoren zählen insbesondere die angebotene logistische Leistung sowie die Gestaltung des Produktprogramms. Aufgabe der Unternehmensführung ist es, die Kundensicht einzunehmen und das Produktangebot in Vielfalt und logistischer Leistung (und somit den gewählten Ausschnitt aus dem Umsystem Markt) zu konfigurieren sowie die Ziele der Produktion vorzugeben. Ziel ist es, einen Fit mit maximalem Überschuss zu erreichen und damit die langfristigen Überlebenschancen des Systems zu erhöhen. (Bauernhansl 2017, S. 10–11)

Aufgabe der Produktionsleitung als gestaltungsverantwortliche Stelle für die logistische Disposition innerhalb der Produktion ist es, die Produktion kontinuierlich zu verbessern. Logistikleistung und Logistikkosten müssen effektiv und effizient balanciert werden, um eine möglichst hohe logistische Zielerreichung zu erzielen. (Wiendahl et al. 2020, S. 246–252; Erlach 2020, S. 15; Wildemann 2018, S. 6–8; Nußbaum 2011, S. 109)



Die Situationsanalyse als initialer Schritt stellt die notwendige Transparenz über das Produkt-Produktionssystem her. So lassen sich an den geeigneten Stellen Maßnahmen zur Verbesserung der Disposition durchführen. (Kersten et al. 2020, S. 12; Bauernhansl et al. 2014, S. 349; Haberfellner et al. 2015, S. 83; Wildemann 2018, S. 60; Schuh et al. 2011, S. 87)

## 1.2 Problemstellung

Bei der Analyse der Dispositionscomplexität umfangreicher Produkt-Produktionssysteme ergeben sich drei Teilprobleme. Der folgende Abschnitt detailliert die Probleme bei der Durchführung einer ganzheitlichen, aufwandsarmen und zielgerichteten Analyse.

### **1) Analyse von Struktur und Verhalten im Produkt-Produktionssystem**

Struktur und Verhalten eines komplexen Systems bedingen sich gegenseitig. Ein zielgerichtetes Analyseverfahren muss daher sowohl die vorherrschende Struktur und ihre Wirkung auf das Systemverhalten als auch das Systemverhalten selbst untersuchen. Nur so können die tatsächlichen Ursachen der logistischen Zielabweichung (innerhalb des Spannungsfelds aus Strukturgestaltung und -betrieb) gefunden werden. (Westkämper et al. 1999; Heinicke 2017, S. 17) Bestehende Ansätze konzentrieren sich in der Regel auf einen der beiden Aspekte:

- *Strukturorientierte* Analyseansätze unterstützen bei der Beschreibung und Klassifikation umfangreicher Produkte oder Produktionen (Nußbaum 2011; Neis 2015). Sie basieren häufig auf normativ formulierten Empfehlungen zur Systemgestaltung, wie beispielsweise der Produktarchitekturgestaltung (Krause et al. 2018) oder die Produktionssegmentierung (Wildemann 1994). Die Auswirkungen, die ungünstige Strukturen innerhalb eines bestehenden Systems auf das Verhalten und damit die logistische Zielerreichung haben, berücksichtigen diese Ansätze kaum oder nur am Rande.
- *Verhaltensorientierte* Analyseansätze untersuchen das Systemverhalten in der Regel detailliert (Jacobsen 2006; Busse 2013). Bestehende Grundmodelle beschreiben die logistischen Wirkzusammenhänge systematisch (Lödding 2016; Nyhuis et al. 2012).

Vorliegende Systemstrukturen werden jedoch in der Regel als mehr oder weniger gegeben hingenommen. Auswirkungen ungünstiger Strukturen (z.B. durch ungeeignete Produktvarianten) adressieren und analysieren diese Ansätze nicht explizit.

Bestehende integrative Ansätze, die Struktur und Verhalten eines Systems gemeinsam betrachten, konzentrieren sich in der Regel auf die Produktion. Dazu zählt beispielsweise die auf den ganzheitlichen Produktionssystemen (Dombrowski et al. 2015) basierende Wertstromanalyse (Erlach 2020). Die Auswirkungen mehrstufiger variantenreicher Produkte auf die Produktion werden bei den aus der Serienfertigung stammenden Ansätzen nur teilweise berücksichtigt. Wie Schuh et al. (2017b, S. 349) aufzeigen, muss ein geeigneter Analyseansatz jedoch auch die Wirkbeziehungen zwischen Produkt und Produktion berücksichtigen.

## **2) Berücksichtigung systematischer Unterschiede in der Disposition**

Die aspektweise Modellierung unterstützt bei der zielgerichteten Analyse umfangreicher und komplexer Systeme. Aufgrund der unterschiedlichen zugrundeliegenden Handlungstheorien ist eine Unterscheidung in die regelkreisbasierte interne Dispositionssicht sowie die verhandlungsbasierte externe Kundensicht sinnvoll. (Wiendahl 2011, S. 65–67) Eine Konzentration der Produktionsleitung auf die interne Dispositionssicht ist aufgrund der höheren Beeinflussbarkeit sinnvoll und üblich. Eine Berücksichtigung der Außensicht bei einer Produktionsanalyse ist dennoch notwendig, um beispielsweise die grundsätzliche logistische Leistungsfähigkeit aus Kundensicht bewerten zu können.

Eine nahezu vollständige Analyse der Systemkomplexität ist, beispielsweise anhand der über 480 von Vogel et al. (2016, S. 29) identifizierten Komplexitätstreiber in Produktionsunternehmen, möglich. Ein solches Vorgehen ist jedoch nicht mit den Praxisanforderungen an ein effizientes Vorgehen vereinbar. Der Einsatz von Heuristiken reduziert den Analyseaufwand deutlich, wobei die Herausforderung in der Auswahl und Konfiguration geeigneter Heuristiken besteht. Einerseits soll für den Anwender keine „Paralysis by Analysis“ (Langley 1995, S. 63) entstehen, andererseits sollen die kritischen Aspekte zuverlässig erfasst werden. (Haberfellner et al. 2015, S. 80–81)

Einzelne Produkt-Produktionssysteme unterscheiden sich teils erheblich in den relevanten Planungs- und Steuerungsprozessen (Schuh et al. 2012b, S. 109), der Organisationsstruktur (Wiendahl et al. 2014, Kap. 4), dem Umgang mit Produkt- und Prozesskomplexität (Schuh et al. 2017a, S. 176) sowie daraus folgend der Rangfolge ihrer Ziele. Eine heuristische Analysemethode, die keine Einschränkungen gegenüber solchen strategischen Entscheidungen und Zielvorgaben trifft, muss in ihrer Durchführungsreihenfolge und den Analyseergebnissen generisch bleiben. Im Rahmen einer Analyse zur Systemverbesserung sollten jedoch zielgerichtet und aufwandsarm konkrete Verbesserungsmöglichkeiten gefunden werden, ohne das bestehende Gesamtsystem grundsätzlich in Frage zu stellen.

Für eine zielgerichtete Analyse zur Verbesserung der Disposition ist somit ein Ansatz notwendig, der prinzipielle Unterschiede in Produkt-Produktionssystem berücksichtigt und sich bestehende Zusammenhänge im Rahmen des Analysevorgehens zu Nutze macht.

### **3) Ganzheitliche Darstellung quantitativer Analyseergebnisse**

Die Digitalisierung und der Einsatz von Unternehmens-IT wie ERP, MES und BDE erzeugen große Datenmengen, die als Ausgangsbasis für eine quantitative logistische und technische Prozessanalyse dienen (vgl. Wiendahl et al. 2019). Bestehende integrative Methoden wie die Wertstromanalyse nutzen diese Daten nicht systematisch und zeigen häufig lediglich ein statisches Systemabbild (Winkler et al. 2017, S. 29, 43). In komplexen Systemen reicht jedoch eine solche mittelwertorientierte Beschreibung und Analyse des Systems nicht aus, da ein solches Vorgehen die negativen Einflüsse der Dynamik nicht angemessen untersucht.

Ergebnis einer Situationsanalyse soll die umfassende, idealerweise quantitative, Darstellung der aktuellen Situation sein. Eine ausschließliche Darstellung in Diagrammen und Tabellen bildet die vielfältigen Wechselwirkungen nicht ausreichend ab. Besser geeignet sind Überblicksdarstellungen, sogenannte „rich pictures“, die quantitative und qualitative Informationen sowie Wirkbeziehungen gemeinsam darstellen (Berg et al. 2013). Es existieren Ansätze zur ganzheitlichen Darstellung der Produktion (z.B. Wertstromdesign nach Erlach 2020) oder einzelner Produkte (z.B. Fristenplan nach Wiendahl 2014, S. 272). Einen Gesamtüberblick erfordert jedoch ein einheitliches Visualisierungskonzept für das Produkt-Produktionssystem.

Die dargestellten Teilprobleme lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Es fehlt eine Analysemethode, die aufbauend auf fundierten Heuristiken die Dispositionskomplexität innerhalb eines bestehenden Produkt-Produktionssystems für die wertstromorientierte Variantenfertigung untersucht und die Ergebnisse adressatengerecht aufbereitet.

### 1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ziel der Arbeit ist es, die Ursachen der Dispositionskomplexität in einem bestehenden Produkt-Produktionssystem zu identifizieren und zu visualisieren. Anhand der Problemstellung lässt sich die Zielsetzung hinsichtlich der untersuchten Systemaspekte, des Betrachtungsgegenstands sowie der eingesetzten Methoden konkretisieren:

- Schwerpunkt der Arbeit bildet die Produktion innerhalb des Produkt-Produktionssystems. Die Produktion soll unter den sich gegenseitig beeinflussenden Aspekten Struktur und Verhalten untersucht werden.
- Die Arbeit konzentriert sich auf die wertstromorientierte Variantenfertigung. Aufgrund der hohen Bedeutung für die Produktion soll die Analyse der Dispositionskomplexität an den logistischen Zielen ausgerichtet werden. Aufgrund der höheren Beeinflussbarkeit durch die Produktionsleitung konzentriert sich die Analyse auf die interne Dispositionssicht.
- Datengrundlage der quantitativen Methode bilden die Systeme der Produktions-IT (ERP, MES, MDE, BDE). Anhand eines heuristischen Analyseverfahrens sollen sich priorisierte Verbesserungsmaßnahmen ableiten lassen. Die quantifizierten Ergebnisse sind so aufzubereiten, dass das Zusammenwirken von Struktur und Verhalten des Produkt-Produktionssystems für die Produktionsleitung ersichtlich werden und Verbesserungsmaßnahmen nachvollziehbar ableitbar sind.

Aus dieser Zielsetzung resultiert die handlungsleitende Forschungsfrage der Arbeit:

*Wie können Ursachen der internen Dispositionskomplexität in einer wertstromorientierten Variantenfertigung mit Hilfe eines heuristischen quantitativen Modells identifiziert und visualisiert werden, um daraus Maßnahmen zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung innerhalb des Produkt-Produktionssystems abzuleiten?*

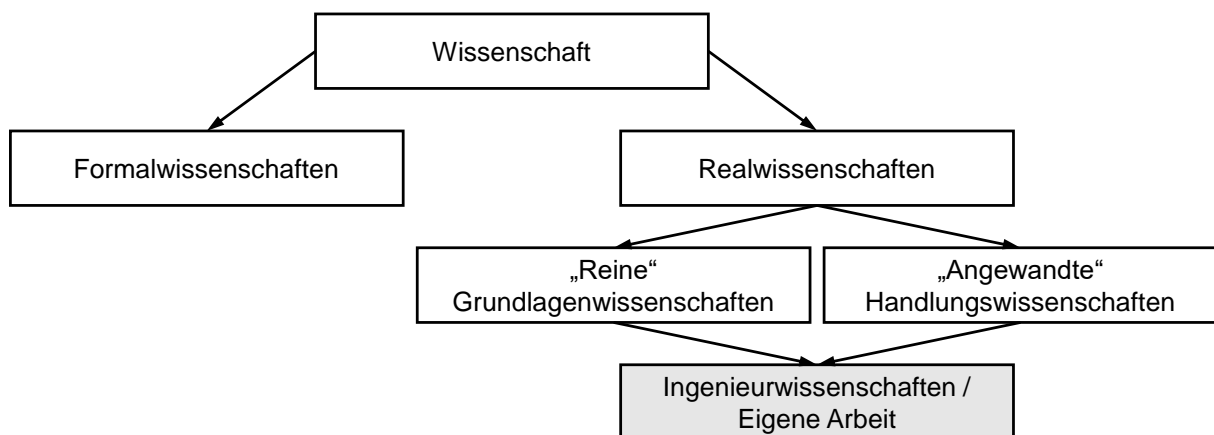
## 1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung

Zunächst wird die zur Beantwortung der Forschungsfrage verwendete Forschungsmethode in den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess eingeordnet (Töpfer 2010, S. 46).

### **Wissenschaftstheoretische Einordnung**

Ulrich und Hill unterteilen Wissenschaften grundsätzlich in Formal- und Realwissenschaften (Ulrich et al. 1976a, S. 305):

- Formalwissenschaften konstruieren Sprachen in Form von Zeichensystemen und Regeln zu deren Verwendung (Bild 1.1). Zu den Formalwissenschaften zählen Philosophie, Logik und Mathematik.
- Absicht der Realwissenschaften ist die „Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (sinnlich) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte.“ (Ulrich et al. 1976a, S. 305) Natur- und Sozialwissenschaften zählen zu den Realwissenschaften.



**Bild 1.1** Wissenschaftliche Positionierung der Arbeit (anhand der Wissenschaftssystematik von Ulrich et al. 1976a, S. 305)

Die Realwissenschaften lassen sich in die zwei Bereiche Grundlagenwissenschaften und Handlungswissenschaften aufteilen: Zentrales Element der Grundlagenwissenschaften ist die Erklärung von Wirklichkeitsausschnitten mit Hilfe von Erklärungsmodellen, z.B. innerhalb der Naturwissenschaften. Bei den Handlungswissenschaften „steht die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zwecks Gestaltung sozialer und technischer Systeme im Vordergrund“ (Ulrich et al. 1976a, S. 305). Zu den Handlungswissenschaften zählen

beispielsweise die Sozialwissenschaften sowie der technische Bereich der Ingenieurwissenschaften. (Ulrich et al. 1976a, S. 305)

Die vorliegende Arbeit bedient sich zur Abbildung des Systems in Struktur und Verhalten bei den Formalwissenschaften. Aufgrund der Absicht, Entscheidungen zur Systemgestaltung zu unterstützen, ist die Arbeit jedoch den Handlungswissenschaften zuzuordnen. Wie in den Ingenieurwissenschaften üblich, bedient sich die Arbeit bei den reinen und den angewandten Wissenschaften. Die zentralen Aspekte des Entdeckungs-, Begründungs- und Verwendungszusammenhangs innerhalb der Realwissenschaften werden nachfolgend detailliert. (Ulrich et al. 1976a, S. 306)

### ***Entdeckungszusammenhang***

Der Entdeckungszusammenhang beschreibt die Auswahl des Forschungsproblems und beantwortet die Frage, aus welchem Ideenspektrum neue Erkenntnisse gewonnen werden (Töpfer 2010, S. 48–49). Die Reflexion des Entdeckungszusammenhangs und damit einhergehend die Reflexion der eigenen Forschungsbiographie tragen zur Reduktion des Subjektivitätsproblems bei (Ulrich et al. 1976a, S. 306). Den Entdeckungszusammenhang der Arbeit bilden die forschungsleitenden theoretischen Grundlagen sowie der Erfahrungshorizont des Autors.

Das grundlegende Systemverständnis basiert auf der allgemeinen Systemtheorie der Technik (Ropohl 1979, 2009, 2012) und den Methoden der Systemgestaltung des 1976 erstmals erschienenen Systems Engineering (Haberfellner et al. 2015, S. 10). Die theoretischen Grundlagen zum Umgang mit komplexen Systemen, insbesondere die am Santa Fe Institut entwickelte Theorie der komplexen adaptiven Systeme (u.a. Gell-Mann 1995; Holland 2006) und die St. Galler Management Schule (u.a. Ulrich et al. 2001; Malik 1996), erweitern das grundlegende Systemverständnis.

Zentrale theoretische Grundlagen im Bereich der Produktion basieren auf dem Hannoveraner Trichtermodell inklusive der Kennlinientheorie nach Nyhuis et al. (2012), dem Auftragsmanagement nach Wiendahl (2011) sowie den Grundlagen der Fertigungssteuerung nach Lödding (2016). Das Vorgehen zur systematischen Analyse der Produktion mit der Absicht einer richtlinienbasierten Umgestaltung basiert auf dem Wertstromdesign nach

Erlach (2020). Die Grundlagen zu modularen Produktfamilien basieren auf der Arbeit von Krause et al. (2018).

Der Erfahrungshintergrund des Autors prägt die Schwerpunktsetzung innerhalb der Arbeit. Die Arbeit in forschungsnahen Industrieprojekten machte den Autor auf die Herausforderungen bei der Analyse der Disposition in der wertstromorientierten Variantenfertigung aufmerksam. Häufig mangelt es in Unternehmen an geeigneten Methoden, die bestehende Komplexität theoriegeleitet und systematisch zu analysieren. Selbst wenn dies erfolgreich möglich ist, fehlen Instrumente, die Ergebnisse adressatengerecht für die Entscheider darzustellen, um geeignete Maßnahmen ableiten und im Unternehmen durchsetzen zu können. Die Arbeit soll einen Beitrag leisten, diese Lücke zu schließen.

### ***Begründungszusammenhang***

Der Begründungszusammenhang konzentriert sich auf die Analyse der aufgestellten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Anhand empirischer Analysen ist deren Gültigkeit zu prüfen. Ein Vorgehen mit einzelnen, voneinander unabhängigen Forschungsschritten ermöglicht die intersubjektive Überprüfbarkeit der aufgestellten Hypothesen. Dabei ist insbesondere das Induktionsproblem, d.h. das Schließen auf generelle Aussagen anhand von Einzelbeobachtungen, zu bewältigen. (Ulrich et al. 1976a, S. 306, 1976b, S. 345; Töpfer 2010, S. 48–49; Popper 1935, S. 1–4)

Ein Verfahren zur Prüfung von Hypothesen bietet der Kritische Rationalismus nach Popper. Dieser geht von der Existenz einer objektiven, geteilten Realität aus. Diese Annahme ist Grundlage dafür, dass Erkenntnisse durch Verstand und Vernunft sowie Beobachtung und Erfahrung überprüfbar sind. Popper lehnt die Möglichkeit der vollständigen Induktion und somit die Verifizierbarkeit von Aussagen im Gegensatz zum Logischen Empirismus/Neopositivismus ab. Zentrale Methoden des Kritischen Rationalismus sind die Falsifikation und die deduktive Nachprüfung. Falsifizierbar ist eine Ursache-Wirkungs-Hypothese dann, wenn diese durch Beobachtung oder Experiment widerlegt werden könnte. Deduktive Nachprüfung bedeutet, die generierte Hypothese in einen praktischen Zusammenhang zu stellen und dort vorläufig zu überprüfen. (Ulrich et al. 1976b, S. 345; Töpfer 2010, S. 112–115; Popper 1935, S. 4–19)

Die vorliegende Arbeit orientiert sich am Vorgehen des Kritischen Rationalismus zur Prüfung der Richtigkeit und Wahrheit von Aussagen und teilt die Problemstellung in einzelne Dimensionen auf: Zunächst wird induktiv die in der Praxis vorliegende Problemstellung aufgezeigt. Darauf aufbauend werden deduktiv relevante Theorien und Modelle beschrieben. Anhand der geschilderten Problemstellung sowie der bekannten Theorien wird der Forschungsbedarf aufgezeigt. Dies ist Grundlage für die Entwicklung des Modells und der Vorgehensweise. Die logische Richtigkeit der einzelnen Analysen lässt sich anhand des verwendeten Modells prüfen und gegebenenfalls falsifizieren. Die vorgeschlagene Methode, das Modell einschließlich der Vorgehensweise, wird anhand eines theoretisch fundierten Anforderungskatalogs sowie anhand der Realisierungsversuche in der Praxis hinsichtlich ihrer Eignung, Konsistenz und Validität geprüft. (Ulrich et al. 1976b, S. 347–349; Töpfer 2010, 49, 114)

### ***Verwendungszusammenhang***

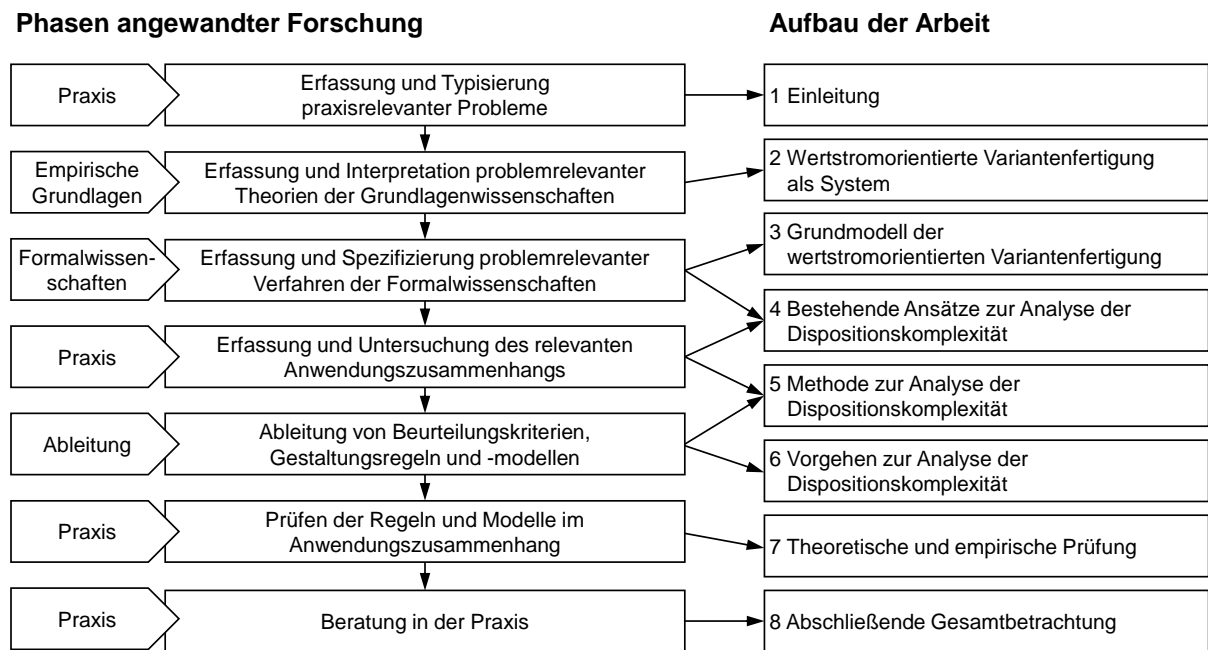
Der Verwendungs- oder Verwertungszusammenhang beantwortet die Frage nach der gesellschaftlichen Verwendung der Forschungsergebnisse und somit der praktischen Relevanz der Forschung. In der Verwertung sollen die gewonnenen Erkenntnisse zur Lösung des im Entdeckungszusammenhangs geschilderten Problems beitragen. (Ulrich et al. 1976a, S. 306–307; Töpfer 2010, S. 49).

Ziel der Arbeit ist es, die Ursachen der Dispositionskomplexität in einem bestehenden Produkt-Produktionssystem zu identifizieren, um anschließend Maßnahmen zur verbesserten Gestaltung ableiten zu können (vgl. Abs. 1.1 & 1.2). Eine so verbesserte Produktion, die wettbewerbsfähige logistische Leistungen anbietet, unterstützt das langfristige Überlebensziel eines Unternehmens.



## 1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist angelehnt an den Forschungsprozess nach Ulrich et al. (2001, S. 195) und in Bild 1.2 dargestellt.



**Bild 1.2** Phasen angewandter Forschung und Aufbau der Arbeit (Phasen nach Ulrich et al. 2001, S. 195)

Kapitel 1 behandelte die praxisrelevante Problemstellung. Kapitel 2 grenzt den Betrachtungsbereich zunächst auf die wertstromorientierte Variantenfertigung ein und stellt anschließend die relevanten Grundlagen der Systemtheorie, der Systemgestaltung sowie der Modellierung dar. Kapitel 3 entwickelt ein auf bestehenden Theorien aufbauendes Grundmodell der wertstromorientierten Variantenfertigung. Kapitel 4 untersucht bestehende Ansätze zur Analyse der Dispositionskomplexität und leitet anschließend den Forschungsbedarf ab. Kapitel 5 beschreibt, aufbauend auf günstigen Systemeigenschaften und relevanten Engpässen, den entwickelten Lösungsansatz. Kapitel 6 beschreibt und detailliert das Vorgehen anhand von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in Einzelanalysen. Kapitel 7 behandelt die interne und externe Verifikation sowie die Validierung am Fallbeispiel. Kapitel 8 reflektiert die Ergebnisse kritisch und zeigt den weiteren Forschungsbedarf auf



## 2 Wertstromorientierte Variantenfertigung als System

Ziel des Grundlagenkapitels ist es, die verwendeten Begriffe eindeutig zu definieren und den Untersuchungsinhalt klar abzugrenzen (vgl. Töpfer 2010, S. 21, 53). Schwerpunkt bilden die systemtheoretischen Grundlagen.

Der erste Abschnitt beschreibt die relevanten Charakteristika und Ziele der wertstromorientierten Variantenfertigung. Die dargestellten Grundlagen der Systemtheorie unterstützen dabei, eine solche Produktion systematisch zu modellieren. Das auf der Systemtheorie aufbauende Systems Engineering liefert die notwendigen Grundlagen der Systemgestaltung sowie das Vorgehensmodell der Analyse. Darauf aufbauend werden Techniken zur quantitativen Modellbildung sowie zur Visualisierung ausgewählt und beschrieben. Der abschließende Ordnungsrahmen führt die Einzelelemente zusammen.

### 2.1 Wertstromorientierte Variantenfertigung

Ziel des Abschnitts ist es, den Betrachtungsbereich auf die wertstromorientierte Variantenfertigung einzugrenzen und eindeutig zu beschreiben. Dazu ordnet der erste Abschnitt das Produkt-Produktionssystem als für die Arbeit relevantes Teilsystem eines Unternehmens ein. Darauf aufbauend beschreibt der zweite Abschnitt die Merkmale der wertstromorientierten Variantenfertigung und legt den Betrachtungsbereich fest. Abschließend werden die relevanten Zieldimensionen dargestellt sowie die unterstellte Zielpriorisierung festgelegt.

#### **2.1.1 Produkt-Produktionssystem als Unternehmensteil**

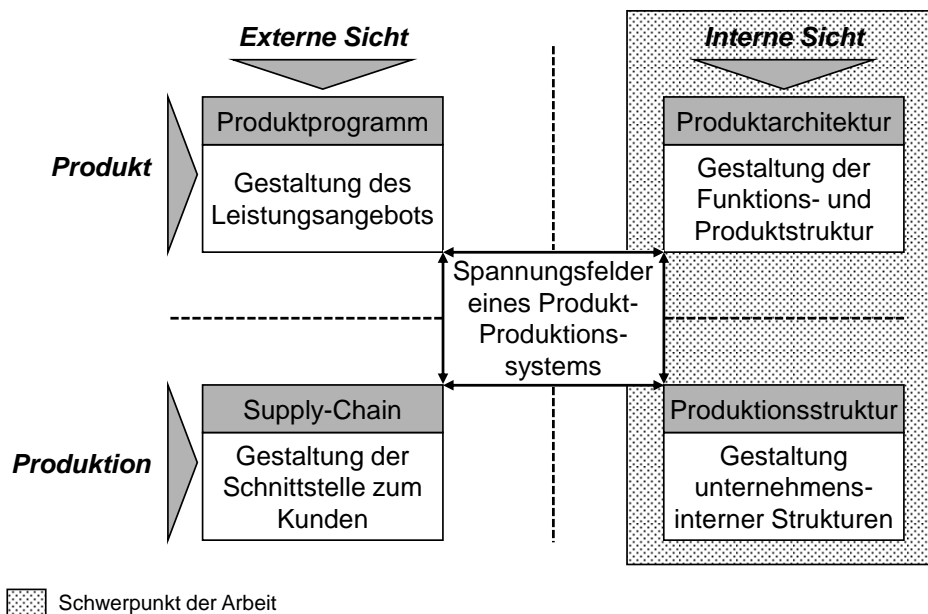
Die Produktionswirtschaft als Teil der Betriebswirtschaft beschäftigt sich mit der gezielt veranlassten qualitativen, quantitativen, räumlichen oder zeitlichen Transformation von

Objekten. Ziel der durch die Transformation erbrachten Leistung ist die Wertschöpfung für Kunden. (vgl. Dyckhoff et al. 2010, S. 3, Westkämper 2014, S. S124)

Zentrale Aufgaben des Produktionssystems sind die Beschaffung der Inputobjekte, die für die Produktion zentralen Transformation dieser Objekte sowie der Absatz der erstellten Outputobjekte. Neben der Leistungserbringung ist die Lenkung des Systems selbst Element des Produktionssystems. Ein solches Produktionssystem besitzt zahlreiche Schnittstellen innerhalb des Unternehmens (Personalwirtschaft, Marketing, Finanzwirtschaft, etc.), die dessen Funktion unterstützen. Nach außen ist das Unternehmen eingebunden in ein System aus Anspruchsgruppen (Wettbewerb, Staat, etc.). (vgl. Dyckhoff et al. 2010, S. 4–5; APICS 2017, S. iii)

Schwerpunkt der Arbeit bildet die *interne Disposition* und damit die Beschaffung und Produktion der Objekte. Die Betrachtung der Beschaffung beschränkt sich auf die unmittelbar für die Transformation relevanten Eigenschaften. Die in der Arbeit betrachteten Objekte beschränken sich auf Produkte in Form diskreter materieller Sachgüter (Stückgüterproduktion). (Dyckhoff et al. 2010, S. 5, 46; Bohl 2015, S. 18; Wiendahl 2011, S. 65–67)

Zwischen Produkten und Produktion bestehen zahlreiche Wechselwirkungen. Bild 2.1 zeigt die zentralen strukturbildenden Elemente dieses, auch als „Produkt-Produktionssystem“ (Schuh et al. 2011, S. 87), bezeichneten Systems: Aus interner Sicht sind dies die Produktarchitektur der angebotenen Sachgüter sowie die zur Leistungserstellung notwendige Produktionsstruktur. Aus externer Sicht werden das dem Kunden angebotene Produktprogramm sowie die Supply-Chain als Kundenschnittstelle unterschieden. (Nußbaum 2011, S. 110; Schuh et al. 2011, S. 94–95; Bohl 2015, S. 40–42)



**Bild 2.1** Teilsysteme eines Produkt-Produktionssystems (Nußbaum 2011, S. 110; vgl. Schuh et al. 2011, S. 95)

Aufgrund der höheren direkten Beeinflussbarkeit bildet die interne Sicht auf das Produkt-Produktionssystem den Schwerpunkt der Arbeit. Die Gestaltung des Produktprogramms selbst wird nicht betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass das angebotene Produktprogramm grundsätzlich den Marktanforderungen genügt bzw. adäquat ist (market fit).

Die Aufgaben zur Lenkung eines solchen Produkt-Produktionssystems umfassen unter anderem die Planung des Produktionsprogramms, die Ableitung der Bedarfe sowie die Terminierung der Produktions- und Beschaffungsaufträge (Schuh et al. 2012c, S. 38–60). Schwerpunkt des Analysevorgehens der Arbeit bildet die Disposition im Rahmen der Auftragsdurchführung. Die Abgrenzung der Arbeit erfolgt daher anhand der außerhalb des Betrachtungsbereichs liegenden Lieferterminermittlung und der innerhalb des Betrachtungsbereichs liegenden Lieferterminerfüllung (vgl. Wiendahl 2008, S. 35).

### 2.1.2 Merkmale der wertstromorientierten Variantenfertigung

Aufgrund der Vielzahl an Produkt-Produktionssystemen mit unterschiedlichsten Merkmalen schränkt der Abschnitt den Betrachtungsbereich weiter auf die wertstromorientierte

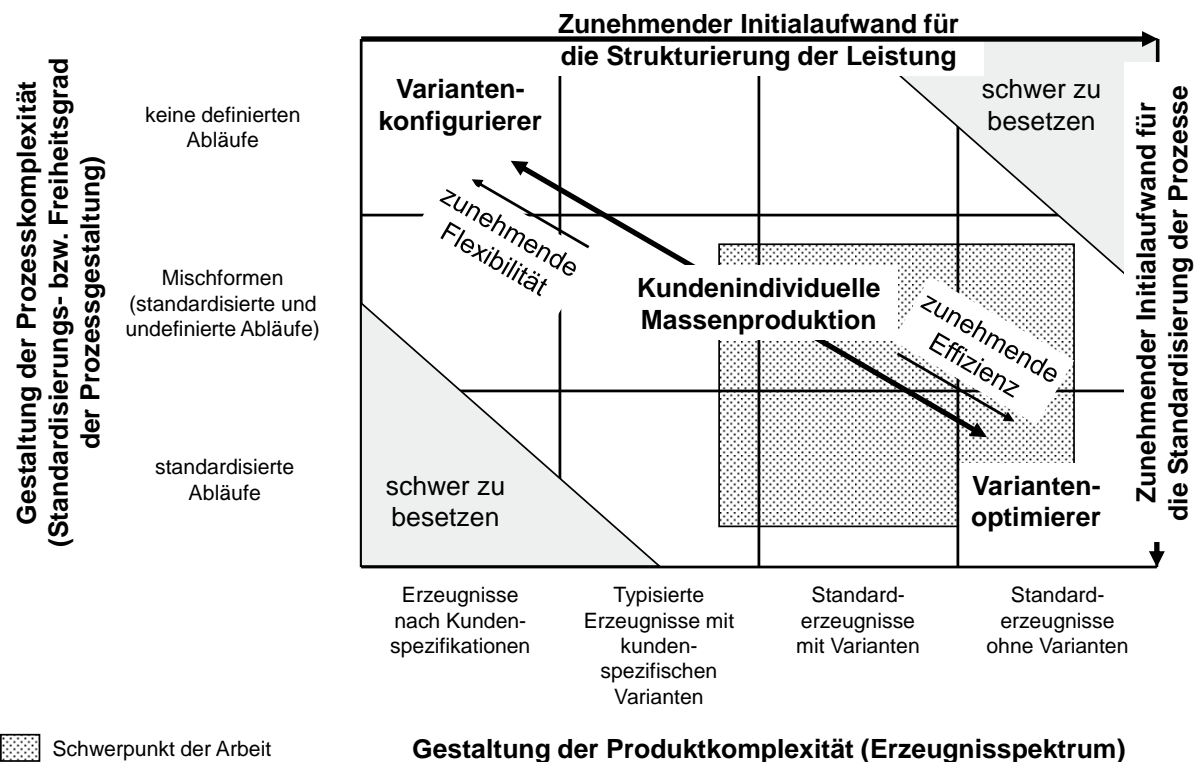
Variantenfertigung ein. Die Einschränkung erfolgt insbesondere hinsichtlich des Organisationskonzepts, des strategischen Umgangs mit kundeninduzierter Vielfalt sowie den Merkmalen der Auftragsabwicklung (Disposition).

Das Organisationskonzept einer Produktion dient als Rahmenwerk zur Gestaltung von Aufbau- und Ablauforganisation. Eines der ersten umfangreichen Organisationskonzepte ist das „Scientific Management“ nach Taylor (1919). Weitere Konzepte sind beispielsweise die Gruppenarbeit oder das Produktionsstufenkonzept. (vgl. Wiendahl et al. 2014, S. 83–115)

Aus der praktischen Erfahrung zeigt sich, dass eine neue Methode, die in einem Unternehmen vorherrschende Prinzipien, Methoden und Werkzeuge berücksichtigt, zu höherer Akzeptanz und geringeren Anpassungsaufwänden führt. Die Beschränkung der Arbeit auf ein konkretes Organisationskonzept scheint daher angebracht.

Das der Arbeit zugrundeliegende Konzept der schlanken Produktion, auch als Toyota Produktionssystem oder Lean Production bezeichnet, erfuhr insbesondere durch die Studie von Womack et al. hohe Aufmerksamkeit (Womack et al. 1990; Ohno 2013; Monden 2012). Zahlreiche Firmen übertrugen das Konzept in firmenspezifische Produktionssysteme. Unter dem Begriff ganzheitliches Produktionssystem wurde es in eine VDI Norm überführt (Dombrowski et al. 2015, S. 22; VDI 2870 Blatt 1; VDI 2870 Blatt 2; Erlach 2020, S. 323–328). Da zahlreiche Ansätze der Industrie 4.0 auf einem ganzheitlichen bzw. schlanken Produktionssystem aufsetzen, sind Produktionssysteme auch weiterhin von hoher Relevanz für die industrielle Praxis (Dombrowski et al. 2016; Bauernhansl et al. 2016, S. 15; Bauernhansl 2021, S. 8). Zur Umsetzung des ganzheitlichen Produktionssystems werden Gestaltungsprinzipien (z.B. Null-Fehler-Prinzip) sowie Methoden und Werkzeuge (z.B. 5S) eingesetzt (VDI 2870 Blatt 1, S. 9–17).

Neben dem gewählten Organisationskonzept spielt auch der strategische Umgang mit der kundeninduzierten Vielfalt eine zentrale Rolle für die Ausrichtung einer Produktion. Einflussgrößen sind der Standardisierungsgrad des Produktprogramms und der damit in Wechselwirkung stehende Standardisierungsgrad der Prozesse. (Schuh et al. 2017a, S. 175–176)



**Bild 2.2** Fokussierung der Arbeit auf Variantenoptimierer (anhand der Gestaltungsoptionen der Produkt- und Prozesskomplexität nach Schuh et al. 2017a, S. 175)

Wie Bild 2.2 darstellt, lassen sich anhand der Einflussgrößen zwei grundsätzliche Strategien sowie eine Mischform identifizieren (Schuh et al. 2017a, S. 175–176; Gilmore et al. 1997):

- Schwerpunkt der *Variantenkonfigurierer* ist die Erstellung kundenindividueller Leistungen mit Hilfe eines flexiblen Produkt-Produktionssystems. Die Standardisierung von Produkten und Prozessen und damit die Möglichkeiten zur Nutzung von Skaleneffekten erfolgt nur nachrangig. (Schuh et al. 2017a, S. 175–176)
- *Variantenoptimierer* hingegen zielen auf eine hohe Standardisierung der Prozesse ab, um Produkte in Serien- oder Massenfertigung mit hoher Effizienz herzustellen. Die Prozessstandardisierung erfordert einen höheren Initialaufwand und ist nur bei entsprechend hohen Stückzahlen wirtschaftlich. (Schuh et al. 2017a, S. 175–176)
- Steigende Anforderungen an das angebotene Produktprogramm und die Effizienz der Produktion führen zur Mischform der *kundenindividuellen Massenproduktion*. Dabei

werden Prozesse mit hoher Wiederholhäufigkeit standardisiert, kundenindividuelle Prozesse hingegen flexibel gestaltet. Damit soll eine gezielte Standardisierung bei hoher angebotener Variantenvielfalt erreicht werden.

Die gewählte Strategie bestimmt die Gewichtung von Flexibilisierung und Standardisierung innerhalb des Produkt-Produktionssystems. Eine praxistaugliche Analyseverfahren muss diese grundsätzlich unterschiedliche Gewichtung berücksichtigen, um das vorliegende Produkt-Produktionssystem im Sinne der strategischen Ausrichtung analysieren und anschließend konsistente Maßnahmen ableiten zu können.

Ursprung der schlanken Produktion ist die auf Standardisierung ausgerichtete Serienfertigung. Schwerpunkt der Arbeit bilden daher Unternehmen, die grundsätzlich die Strategie des Variantenoptimierers verfolgen, sich jedoch aufgrund geänderter Marktanforderungen zunehmend in Richtung schlanker, kundenindividuelle Massenproduktion ausrichten. Die Gestaltung und Konfiguration der angebotenen Vielfalt, d.h. des Produktprogramms aus Sicht der Unternehmensstrategie etc., liegen aufgrund des Fokus auf die Produktion nicht im Betrachtungsbereich der Arbeit.

Anhand der Auftragsauslösungsart können nach Schuh et al. die vier typischen Formen der Auftragsabwicklungsstruktur Auftrags-, Rahmenauftrags-, Varianten- und Lagerfertigung unterschieden werden (Schuh et al. 2012b, S. 136). Ausgehend von der Auftragsabwicklungsstruktur der Variantenfertigung werden im Folgenden die Merkmale der wertstromorientierten Variantenfertigung zusammengefasst. Die dazu verwendete und in Bild 2.3 dargestellte Morphologie basiert auf der Betriebsmorphologie nach Wiendahl (2011, S. 190) sowie Elementen der Morphologie der lokalen Auftragsabwicklung nach Schuh et al. (2012b, S. 122). (vgl. Wiendahl 2011, S. 189–192; Lödding 2016, S. 626; Schenk et al. 2014, S. 51; Heinicke 2017, S. 15).



Merkmale		Ausprägungen				
Produktprogramm	Kundenbezug	kundenspezifisch	Produktfamilien (variantenreich)	Standardprodukt (mit Varianten)	Standardprodukt	
	Zulieferebene	Einzelteil	Komponente	Endprodukt		
	Stücklistentiefe / Dispositionsstufen	viele	wenige	einstufig	Handel (inkl. externe Produktion)	
Arbeits-system	Ablaufprinzip	Baustelle	Werkstatt	Insel	Linie	
	Materialflusskomplexität	komplex mit Rückflüssen	komplex ohne Rückflüsse	linear		
	Externe Bearbeitung	Keine	Geringer Anteil	Hoher Anteil	Sehr hoher Anteil	
Kunden-auftrag	Bevorratungsstrategie	engineer-to-order	make-to-order	assemble-to-order	make-to-stock	
	Auftragstyp	Einzelstück	Kleinserie	Serie	Großserie Massenfertigung	
	Anteil Eilaufträge	Keine Eilaufträge	Geringer Anteil	Hoher Anteil		
Produktions-auftrag	Turbulenz durch geänderte Aufträge	Unbedeutend	Gering	Hoch	Sehr hoch	
	Auslösegrund	Nachfrage Kundenauftrag	Prognose Vorhersageauftrag	Verbrauch Lagernachfüllauftrag	Prognose Rahmenvertrag	
	Auftragstyp	Einzelstück	Kleinserie	Serie	Großserie Massenfertigung	

**Bild 2.3** Fokussierung der Arbeit auf wertstromorientierte Variantenfertiger (Morphologie in Anlehnung an Wiendahl 2011, S. 190, Schuh et al. 2012b, 169, 122)

Die Morphologie beschreibt die Merkmale der wertstromorientierten Variantenfertigung in vier Gruppen:

- **Produktprogramm:** Innerhalb der wertstromorientierten Variantenfertigung ist eine Entkopplung von Produktentstehungszyklus und Logistikzyklus üblich. Die Produktion konzentriert sich auf die Herstellung bereits spezifizierter variantenreicher Produkte aus zugelieferten Einzelteilen und Komponenten (Wiendahl 2011, S. 269–274). Um die Varianz geeignet abbilden und disponieren zu können, sind die Produkte mehrstufig aufgebaut. Die Erweiterung des Produktprogramms durch Handelsware ist denkbar.
- **Arbeitssystem:** Dem Wertstromgedanken folgend, sind die Arbeitssysteme in der Regel als Linien oder Inseln aufgebaut. Idealtypisch sind lineare Materialflüsse, wobei sich komplexere Materialflüsse aufgrund der Produkt- und Produktionsstrukturen nicht immer vermeiden lassen. Um kurze Durchlaufzeiten erreichen zu können, ist der Anteil an externer Bearbeitung gering.

- **Kundenauftrag:** Die Bestimmung der geeigneten Entkopplung von Lieferung und Herstellung über Lager ist eines der zentralen Gestaltungsmerkmale in der Variantenfertigung, wobei die Bevorratungsstrategien make-to-order und assemble-to-order vorherrschen (Wiendahl 2011, S. 269–274). Aufgrund der hohen Varianz werden Kundenaufträge üblicherweise als Einzel- oder Kleinserienaufträge ausgelöst. Durch eine geeignete Kundenentkopplung lassen sich kurze Lieferzeiten aus Kundensicht auch bei langen Beschaffungs- und Produktionsdurchlaufzeiten erreichen. (Schuh et al. 2012b, S. 168–171) Auch kurze Lieferzeiten können einen geringen Anteil an Eilaufträgen nicht verhindern.
- **Produktionsauftrag:** Der geringe Anteil an Eilaufträgen reduziert unter anderem die durch geänderte Aufträge verursachte Turbulenz. Technische und logistische Änderungen an Produktionsaufträgen nach Auftragsfreigabe sind eher unüblich (Schuh et al. 2012b, S. 168–171). Abhängig von den Komponenteneigenschaften wie beispielsweise Wert oder Verbrauchshäufigkeit erfolgt die Auftragsauflösung nachfrage-, prognose- oder verbrauchsorientiert. Insbesondere kundenanonyme Komponenten können in Serie produziert werden. Kundenspezifische Komponenten werden in der Regel entsprechend des Kundenauftrags als Einzel- oder Kleinserienaufträge produziert.

### 2.1.3 Zugrundeliegendes Zielsystem und Zielpriorisierung

Um ein Produkt-Produktionssystem gezielt analysieren zu können, ist es notwendig, die zu berücksichtigenden Ziele und ihre Priorisierung zu kennen (vgl. Haberfellner et al. 2015, S. 217). Der Abschnitt zeigt daher zunächst die zu balancierenden Zieldimensionen der Fabrik auf. Anschließend legt er die für die Arbeit relevante Rangfolge der betrieblichen Hauptziele für die wertstromorientierte Variantenfertigung fest.

Das langfristige Überleben kann als allgemeines und weitgehend unbestrittenes *Ziel eines Unternehmens* gefasst werden. Insbesondere in dynamischen Umwelten lässt sich dieses Ziel weiter in die zwei zu balancierenden Unterziele Exploitation und Exploration aufteilen (Stüttgen 2003, S. 335–336, vgl. March 1991, S. 71; Axelrod et al. 2000, S. 43–50):

- *Exploitation* zielt auf die Sicherstellung des gegenwärtigen Überlebens, beispielsweise durch die Steigerung der Produktivität ab.
- *Exploration* hingegen zielt auf die Schaffung geeigneter Voraussetzungen für die Lebensfähigkeit in einer zukünftigen, geänderten Umwelt ab, beispielsweise durch die Investition in neue Technologien.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Analyse zur Verbesserung einer bestehenden Produktion und somit auf der *Exploitation*. Die Bewertung aktueller, vermeintlich ungünstiger, Zustände muss jedoch die langfristigen Ziele (*Exploration*) berücksichtigen.

Allgemein lassen sich die *Ziele der Produktion* in den drei Hauptdimensionen Qualität, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit beschreiben. Erlach (2020, S. 18–26) erweitert das Zielsystem der Produktion um die Dimension Variabilität. Aus Marktsicht bezeichnet Variabilität das grundsätzliche angebotene Produktprogramm (*Lieferbarkeit*), unabhängig von der aktuellen Verfügbarkeit eines Produkts zu einem Termin (*Lieferfähigkeit*). Aus Betriebsicht zeichnet sich Variabilität durch Flexibilität und Wandlungsfähigkeit aus. Sie ermöglicht es, das angebotene Produktprogramm wirtschaftlich herzustellen. (vgl. Schönsleben 2020, S. 38; Slack et al. 2013, S. 46–58)

Rangordnung	Logistische Ziele	Produktionstechnische Ziele
1. Qualität	<b>Hohe Liefertermintreue</b> „Kundensicht einnehmen“	<b>Nullfehler-Produktion</b> Ausschuss als schlimmste produktionstechnische Verschwendung
2. Geschwindigkeit	<b>Niedrige Produktions-Durchlaufzeit</b> Bestände als schlimmste logistische Verschwendung	<b>Hohe Maschinen-Verfügbarkeit</b> Fokus auf TPM („Total Productive Maintenance“)
3. Wirtschaftlichkeit	<b>Hohe Maschinen-Auslastung</b> „Low-Cost Automation“	<b>Hohe Mitarbeiter-Produktivität</b> Fokus auf Taktabstimmung („Operator Balance Chart“)
4. Variabilität	<b>Hohe Produktvielfalt</b> Reihenfolgebildung mit „Heijunka-Box“	<b>Hohe Maschinen-Flexibilität</b> „Reduktion des EPEI („Every Part Every Interval“)

**Bild 2.4** Rangordnung der Fabrikziele in der schlanken Produktion (nach Erlach 2020, S. 27)

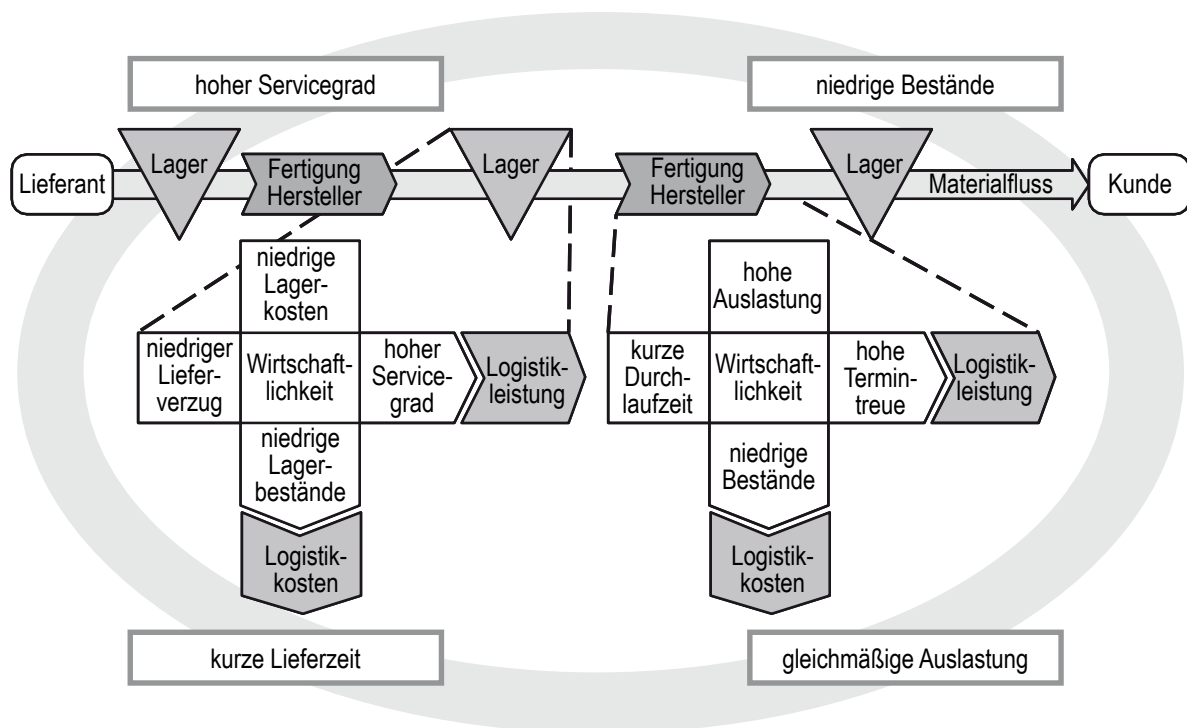
Bei Verwendung der klassischen Methoden der schlanken Produktion ergibt sich die in Bild 2.4 dargestellte Zielhierarchie für logistische und produktionstechnische Ziele (Erlach 2020, S. 27–28):

- Oberstes Ziel ist eine hohe *Qualität* in Form von termintreuen Lieferungen an den Kunden ohne Fehler.
- Dies lässt sich durch eine hohe logistische *Geschwindigkeit* in Form kurzer Durchlaufzeiten erreichen. Die dafür notwendigen niedrigen Bestände lassen sich nur bei stabilen Prozessen mit hoher Verfügbarkeit erzielen.
- *Wirtschaftlichkeit* wird vorrangig durch die Vermeidung von Verschwendung (z.B. Bestände, Störungen, etc.) erreicht. „Low-Cost Automation“ ermöglicht einen wirtschaftlichen Betrieb unterhalb der Vollauslastung, welche notwendig ist, um kurze Durchlaufzeiten und niedrige Bestände zu ermöglichen.
- Das Erreichen einer hohen *Variabilität* besitzt im klassischen Lean die geringste Priorität. Im Fokus der Variabilität stehen Maschinen mit hoher Mix-Flexibilität.

In einer sich kontinuierlich verändernden Umwelt erhöht die Variabilität die langfristige Überlebensfähigkeit des Systems. Die Analyse sollte die Variabilität daher explizit berücksichtigen.

Um eine Methode mit hoher Anwendbarkeit entwickeln zu können, ist es notwendig, die Rangfolge der zu untersuchenden Ziele bereits für die Analyse festzulegen (Haberfellner et al. 2015, S. 217; Erlach 2020, S. 26; Wiendahl 2011, S. 415). Die vorliegende Arbeit unterstellt die in Bild 2.4 dargestellte Zielpriorisierung. Diese Priorisierung entspricht weitgehend der Positionierung der „Logistik als strategischer und operativer Wettbewerbsfaktor“ (Wiendahl 2011, S. 267). Aufgrund des unterstellten Organisationsprinzips der schlanken Produktion erscheint die gewählte Rangfolge nachvollziehbar.

Schwerpunkt der Arbeit bilden die logistischen Ziele der Fabrik. Zur quantitativen Abbildung dieser Ziele innerhalb einer mehrstufigen Variantenfertigung eignet sich das in Bild 2.5 dargestellte Zielsystem der logistischen Lieferkette. Wiendahl et al. (2012) bilden eine mehrstufige Produktion als Lieferkette mit den Elementen Fertigung und Lager ab.



**Bild 2.5** Zielsysteme der logistischen Lieferkette (nach Wiendahl et al. 2012, S. 12)

In einer Lieferkette sind die Zielsysteme der Produktionslogistik und des Lagermanagements zu berücksichtigen. Für Produktion und Lager lassen sich jeweils zwei konkurrierende Zielrichtungen zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit unterscheiden (Wiendahl et al. 2012, S. 12–13; Nyhuis et al. 2012, S. 275):

- *Logistikleistung*: Niedriger Lieferverzug und hoher Servicegrad im Lager sowie kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue in der Produktion unterstützen eine hohe Logistikleistung.
- *Logistikkosten*: Niedrige Lagerkosten und niedrige Bestände im Lager sowie eine (gleichmäßig) hohe Auslastung und niedrige Bestände in der Produktion unterstützen das Ziel geringer Logistikkosten.

Aufgrund der gewählten Zielpriorisierung fokussiert das Analyseverfahren in der Arbeit auf das Erreichen einer hohen Logistikleistung. Das Zielsystem der logistischen Lieferkette quantifiziert Variabilität und Produktqualität nicht explizit. Im Rahmen der zu entwickelnden Analyse sind Variabilität und Produktqualität in einer wertstromorientierten Variantenfertigung zu untersuchen.

## 2.2 Relevante Grundlagen der Systemtheorie

Ziel des Abschnitts ist es, das für die Analyse eines umfangreichen Produkt-Produktionssystems verwendete systemtheoretische Grundverständnis darzulegen. Der erste Abschnitt beschreibt zunächst die relevanten Grundlagen der Systemtheorie. Die folgenden Abschnitte konkretisieren die Systembeschreibung hinsichtlich Struktur und Verhalten. Der abschließende Abschnitt stellt die Besonderheiten komplexer adaptiver Systeme dar, zu denen auch die wertstromorientierte Variantenfertigung zählt.

### 2.2.1 Systembegriff und Aspekte eines Systems

Die Überlegungen zu Systemen sowie die Unterscheidung zwischen bloßen Mengen und geordneten Mengen – dem Ganzen – geht auf Aristoteles zurück. Ausgangspunkt der modernen Systemtheorie ist die disziplinübergreifende allgemeine Systemlehre, basierend auf den Arbeiten von Bertalanffy. (Ropohl 2009, S. 71–72, 2012, S. 13–49; Bertalanffy 1968, 1972).

„Ein *System* ist das Modell einer Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.“ (Ropohl 2009, S. 77). Ropohl zeigt mit der Definition den Unterschied zwischen der Wirklichkeit und ihrer Abbildung in einem System auf. Insbesondere bei der Umgestaltung wird dieser Unterschied deutlich: Anhand eines Modells werden Lösungen entwickelt und ggf. überprüft. Die tatsächliche Wirkung entfalten die Veränderungen jedoch erst bei der Umsetzung in der Wirklichkeit. Dabei kommt es zu Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit. (Ropohl 2012, S. 51–58; Grossmann 1992, S. 212–213)

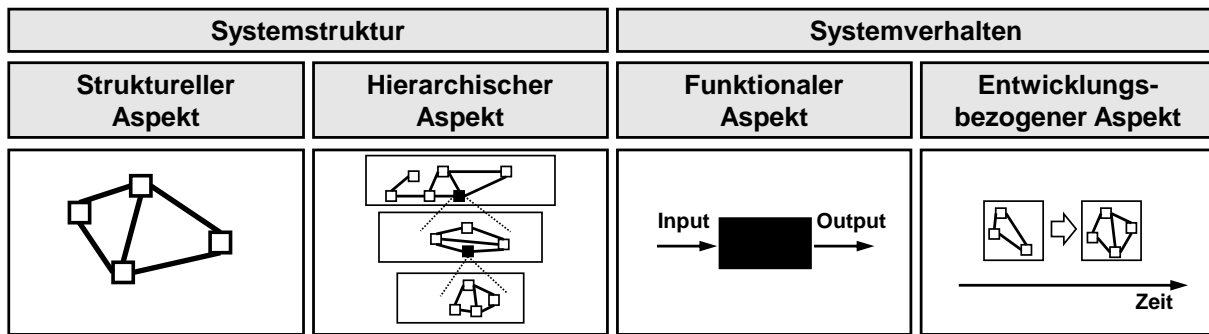
*Systemgrenzen* grenzen das System von Anderem (der *Umgebung*) ab. Die in der Umgebung vorhandenen Systeme heißen *Umsysteme*. Bei Systemen, die Austauschbeziehungen mit ihrer Umgebung besitzen, handelt es sich um *offene Systeme*, andernfalls um *geschlossene Systeme*. (Ropohl 2009, S. 80; Haberfellner et al. 2015, S. 32–33)

Die Komplexität zur Beschreibung eines Systems hängt stark vom verwendeten Beschreibungssystem ab (Simon 1962, S. 481). Zur Reduzierung der dargestellten Komplexität und zur Vereinfachung der Systemanalyse lassen sich Systeme unter verschiedenen Sichten

bzw. Aspekten darstellen: Dadurch treten einige Objekte oder Eigenschaften des Systems hervor, wohingegen andere zwangsläufig in den Hintergrund treten. Die so gebildeten Systeme heißt *Teilsysteme*. Ein Aspekt lässt sich nach *Betrachtungsposition* (aus welcher Perspektive wird das System betrachtet?), *Betrachtungsobjekt* (welche Objekte werden in welchem Zeitraum betrachtet?) und *Betrachtungsinhalt* (welche Eigenschaften, welches Systemkonzept steht im Vordergrund?) unterscheiden. (Haberfellner et al. 2015, S. 37–42; Wiendahl 2011, S. 36–37; Specker 2005, S. 33; Ropohl 2009, S. 75–77)

Die Systemdefinition nach Ropohl umfasst drei Konzepte zur Beschreibung der einzelnen Aspekte des Systems: a) Das *funktionale Systemkonzept* sieht das System als Black Box und fokussiert auf die Beschreibung des Systemverhaltes. b) Das *strukturelle Systemkonzept* (in der Arbeit als strukturelles Systemkonzept bezeichnet) beschreibt die Elemente eines Systems sowie die Relationen der Elemente zueinander. c) Das *hierarchische Systemkonzept* betont, dass Teile eines Systems (*Subsysteme*) wiederum als System beschreibbar sind und Teil eines umfassenderen Systems (*Supersystem*) sein können. (Ropohl 2009, S. 75–77)

Im Zeitablauf können sich Systeme in einem oder mehreren der drei Aspekte verändern (Ropohl 2009, S. 81; Cilliers 1998, S. 4; Patzak 1982, S. 26–29; Haberfellner et al. 2015, 74, 63). Eine solche Veränderung des Systems über den Zeitablauf lässt sich für jeden der drei Aspekte darstellen. Ropohl betrachtet eine solche Veränderung des Gesamtsystems im Zeitablauf nicht explizit. Diese Veränderung ist jedoch aufgrund der sich verändernden Umwelt und des Systems selbst von besonderer Bedeutung für Produkt-Produktionssysteme. Diese Arbeit bezeichnet den Aspekt, der genau diese Entwicklung des Systems im Zeitablauf hervorhebt, als *entwicklungsbezogenes Systemkonzept*.



**Bild 2.6** Aspekte eines Systems

Somit ergeben sich für die Arbeit die vier in Bild 2.6 dargestellten Aspekte eines Systems. Diese Arbeit fasst unter dem Begriff der Systemstruktur den strukturellen und den hierarchischen Aspekt zusammen. Unter dem Begriff Systemverhalten fasst sie den funktionalen und den entwicklungsbezogenen Aspekt zusammen. (vgl. zur Untergliederung in Struktur und Verhalten Haberfellner et al. 2015, S. 183; Riedl 2000, S. 8; Staud 2019, S. 11; Patzak 1982, S. 26; Wiendahl et al. 1994, S. 533; ElMaraghy et al. 2012, S. 795–796). Angelehnt an die oben definierten Aspekte beschreiben die folgenden Abschnitte die Grundbegriffe der Systemstruktur und des -verhaltens.

### 2.2.2 Beschreibung der Systemstruktur

Zur Beschreibung von Systemstrukturen haben sich unterschiedliche Begriffssysteme entwickelt. Grundlage der Arbeit bildet die Systemtheorie und die damit einhergehenden Begriffsdefinitionen nach Ropohl (2009) und Haberfellner et al. (2015).

Zu den zentralen Datenquellen der Arbeit zählen industriell eingesetzte Softwaresysteme wie ERP, MES und BDE. Als Standard zur Abbildung und Modellierung solcher Systeme hat sich die Unified Modeling Language (UML) etabliert (Balzert 1999, S. V; OMG 2015). Ein begrifflicher Abgleich zwischen der Systemtheorie und der UML ist daher für den Verlauf der Arbeit erforderlich. Sofern eine weitere Konkretisierung der verwendeten Begriffe notwendig ist, orientieren sich diese an den Begriffen der Datenanalysebibliothek Pandas. Dies soll eine spätere Implementierung der Methode in der populären Programmiersprache Python vereinfachen. (McKinney 2014, S. 289; McKinney et al. 2020, Abs. 3.14; PYPL 2022).



Der *strukturelle Systemaspekt* lässt sich über Objekte abbilden. Ein *Objekt* als Instanz einer Klasse stellt die abstrakteste Beschreibung innerhalb eines System dar. Ein Objekt besitzt unveränderliche Attribute, zugehörige, veränderliche Attributwerten sowie Verbindungen zu anderen Objekten. Die Verbindungen zu anderen Objekten sind wiederum als Objekte modelliert. (Balzert 1999, S. 45)

Diese Arbeit unterteilt ein Objekt in Element und Beziehungen. Das *Element* bezeichnet das Objekt ohne seine Beziehungen. Als *Beziehungen* werden die Verbindungen zwischen dem Element und Elementen anderer Objekte bezeichnet. (Haberfellner et al. 2015, S. 32). Solche auch als *Assoziationen* bezeichneten Beziehungen beschreiben die Zusammenhänge zwischen Objekten einer oder mehrerer Klassen. Über die Kardinalität lassen sich *Muss-* (Kardinalität größer gleich 1) und *Kann-Assoziationen* (Kardinalität größer gleich 0) unterscheiden. Verbindungen zwischen Objekten derselben Klasse werden als *reflexive Assoziationen* bezeichnet. (Balzert 1999, S. 40–42)

Ausgehend von den Bezugspunkten Objekt und Klasse lässt sich der *hierarchische Systemaspekt* auf zwei Arten abbilden. Beide sind für die Arbeit relevant.

Die Elemente eines Systems, abgebildet durch instanziierte Objekte, können anhand ihrer Eigenschaften klassifiziert werden. Ein Element kann, je nach Zweck der Klassifikation in mehreren unterschiedlichen mono- oder polyhierarchischen Klassifikationssystemen, eingeordnet sein. Die durch die Einordnung in ein Klassifikationssystem entstandene Struktur der Elemente wird in dieser Arbeit als (Elementen-) *Hierarchie* bezeichnet. (DIN 32705) Die Bildung geeigneter Hierarchien und die Einordnung der Elemente in diese Hierarchien ist insbesondere für die zielgerichtete Analyse umfangreicher Systeme notwendig.

Von der auf instanziierte Objekte bezogenen Klassifikation ist die auf Klassen bezogene Vererbung zu unterscheiden. Die hierarchische Beziehung zwischen einer allgemeinen und einer spezialisierten Klasse wird als *Vererbung* bezeichnet. Die Unterklasse erbt (als Spezialisierung der Oberklasse) alle Eigenschaften der Oberklasse (als Generalisierung der verbundenen Unterklassen) und kann die Eigenschaften der Oberklasse erweitern bzw. verändern. So entsteht eine *Vererbungsstruktur*. Bei der Einfachvererbung kann jede Klasse nur eine direkte Oberklasse besitzen, wodurch baumartige Hierarchien entstehen.

(Balzert 1999, S. 51–54; DIN 32705, S. 3) Die Entwicklung einer geeigneten Vererbungsstruktur ist notwendig, um das reale System in einem einfachen und dennoch aussagekräftigen Grundmodell abzubilden.

### 2.2.3 Beschreibung des Systemverhaltens

Das Systemverhalten beeinflusst die logistische Zielerreichung in der Regel unmittelbar. Grundlage zur Beschreibung der Systemfunktion bildet das zunächst dargestellte regelkreisbasierte Handlungssystem. Anschließend führt der Abschnitt die zentralen Begriffe zur Beschreibung des daraus resultierenden Systemverhaltens sowie der -entwicklung ein.

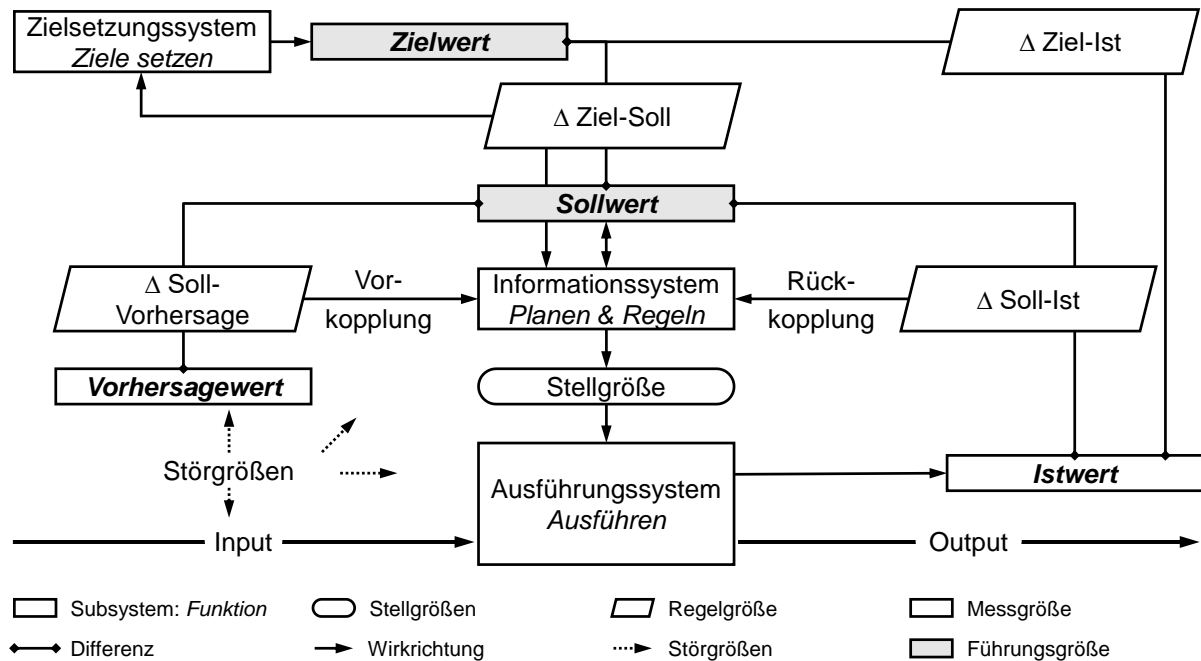
#### ***Regelkreisbasiertes Handlungssystem***

Die Handlungen der Akteure eines Systems lassen sich mit Hilfe der allgemeinen Systemtheorie als Handlungssysteme beschreiben (Ropohl 2009, S. 89). Die Funktionen zur Beschreibung des Verhaltens lassen sich in Zielsetzung, Planung, Handlung und Prüfung unterteilen. Durch die Prüfung erfolgt eine Kopplung mit den gesetzten Zielen und es entsteht der in der Kybernetik zentrale Regelkreis. Das Handlungssystem lässt sich in die Subsysteme Zielsetzungs-, Informations- und Handlungssystem gliedern, wobei nicht immer alle Subsysteme innerhalb des Betrachtungsbereichs liegen (Ropohl 2009, S. 101–102; Wiendahl 2011, S. 39–41):

- Bei technischen Systemen sind Informations- und Zielsetzungssystem in der Regel nicht Teil des betrachteten Systems (Kybernetik erster Ordnung).
- Bei sozio-technischen Systemen ist das Informationssystem sowie in gewissem Rahmen, dem sogenannten Handlungsspielraum, auch das Zielsetzungssystem Teil des betrachteten Systems (Kybernetik zweiter Ordnung). Die durch den Handlungsspielraum entstandene Autonomie von Subsystemen begünstigt die effektive Komplexitätsbewältigung.

Bild 2.7 zeigt die zentralen Größen sowie die grundsätzlichen Wirkungen in einem regelkreisbasierten Handlungssystem aus Sicht des Informationssystems. Das Zielsetzungssystem legt den *Zielwert* als Führungsgröße mit üblicherweise langfristiger Gültigkeit fest. Die zentrale Führungsgröße für das Informationssystem, der *Sollwert*, besitzt hingegen

häufig eine kurzfristigere Gültigkeit und bezieht sich auf einen einzelnen Auftrag bzw. eine Ressource. (Wiendahl 2011, S. 92, 108–109)



**Bild 2.7** Handlungssystem als Regelkreis (in Erweiterung zu Ropohl 2009, S. 100–102; Schwaninger 1994, S. 22–24; Wiendahl 2011, S. 40)

Die für das Handlungssystem zentrale Regelung erfolgt durch das Informationssystem, wobei zwei grundsätzliche Arten der Regelung unterschieden werden (Wiendahl 2011, S. 39–43):

- Bei einer *Rückkopplung* wird die Abweichung zwischen Soll- und Istwert zur Regelung verwendet. Diese klassische Art der Regelung besitzt Vergangenheits- bzw. Gegenwartsbezug und ist robust gegenüber Fehlern in der Modellierung des Ausführungssystems.
- Die *Vorkopplung* ist zukunftsbezogen und regelt die Abweichung zwischen Soll- und einem voraussichtlichen Istwert, dem *Vorhersagewert*. In der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) heißt der Vorhersagewert alternativ auch Plan-Wert. Die Ermittlung des Vorhersagewerts stellt höhere Anforderungen an die Modellierungsgenauigkeit als die Ermittlung des Istwerts.

Stellgrößen werden durch das Informationssystem beeinflusst und veranlassen das Ausführungssystem zur Handlung. Die Stellgröße eines Systems kann als Ziel- oder Sollwert Führungsgröße für ein untergeordnetes System sein. Störgrößen wirken auf die Subsysteme des Handlungssystems. Insbesondere bei einer vorkoppelnden Regelung können die Störgrößen teilweise bei der Festlegung der Stellgrößen berücksichtigt werden. (Wiendahl 2011, S. 41–42, 92, 108–109)

Bild 2.7 stellt das Grundprinzip eines Regelkreises für ein einzelnes Ziel dar. Sind mehrere (konkurrierende) Ziele zu erfüllen, ist es hilfreich, deren Wirkzusammenhänge zu kennen, um geeignet in das System eingreifen zu können. *Fehler-* oder *Teufelskreise* entstehen durch fehlende Kenntnis der Wirkzusammenhänge und der damit verbundenen ungeeigneten Lenkungseingriffe. Insbesondere bei verzögerter positiver Rückkopplung führen diese zu Verstärkungen ungewünschter, häufig pathologischer, Abweichungen. (Braha 2006, S. 112–115; Stüttgen 2003, S. 277)

„Ein ‚constraint‘, zu Deutsch eine Beschränkung, ist irgendein Element oder Faktor, der ein System daran hindert, eine höhere Leistung im Hinblick auf sein Ziel zu erbringen.“ (Schönsleben 2020, S. 237) Spätestens seit der „Theory of Constraints“ ist die Identifikation, Planung und Steuerung von Beschränkungen eines Systems eine zentrale Aufgabe innerhalb der Produktion (Goldratt et al. 2001; Lödding 2016, S. 104). Der *Engpass* ist diejenige Beschränkung mit den größten Auswirkungen auf eines oder mehrere (logistische) Ziele. Der Engpass kann im Zeitverlauf wandern, d.h. ein anderes Objekt einer Menge wird zum Engpass. Je komplexer ein System ist, desto häufiger tritt er im Zeitablauf an unterschiedlichen Elementen auf und desto schwieriger ist es, den Engpass zu bestimmen. (Wiendahl 2002, S. 202; Schönsleben 2020, S. 236; Beer 2015, S. 36–47, 77; Lödding 2016, S. 546)

### **Systemverhalten und -entwicklung**

Systeme sind häufig durch Dynamik, d.h. eine zeitliche Änderung zentraler Kennwerte, gekennzeichnet. Zur detaillierten Beschreibung der Dynamik eines Produkt-Produktionssystems eignet sich der Begriff der *Turbulenz*. Diese liegt vor, wenn eine Kennzahl für ein Objekt signifikant vom Mittelwert der Kennzahl für eine Menge ähnlicher Objekte ab-

weicht. Die Signifikanz wird anhand vereinbarter Toleranzen definiert. In einem turbulenten Umfeld lässt sich nur schwer vom mikroskopischen Verhalten der Objekte auf das makroskopische Verhalten des Systems schließen. (Westkämper et al. 2000a, S. 204–205; Wiendahl 2011, S. 207–208; Unbehauen et al. 2014, S. 5)

Die Ursachen für Turbulenz werden als *Turbulenzkeime* bezeichnet und können in fünf Ursachengruppen gegliedert werden: *Streuung* bezeichnet den Unterschied ähnlicher Werte innerhalb einer Periode, *Schwankung* hingegen bezeichnet die Veränderung eines Werts im Zeitverlauf. *Anpassungen* sind kurzfristige Änderungen von Vorgabe- oder Vorhersagewerten. *Inkonsistenzen* können durch unterschiedlich definierte Toleranzen auftreten. *Abweichungen* sind die signifikanten Unterschiede zwischen Soll- bzw. Plan- und Istwerten. (Wiendahl 2011, S. 209–216)

Um die gesetzten Systemziele in einem turbulenten Umfeld erreichen zu können, sind Anpassungen notwendig. Die *Veränderungsfähigkeit* beschreibt die grundsätzliche Fähigkeit eines Systems sich anzupassen. Die Arbeit unterscheidet drei Formen der Veränderungsfähigkeit anhand des Grades der Vorhersehbarkeit (Seebacher 2013, S. 24–25; Wiendahl et al. 2007; Wiendahl et al. 2014, S. 140):

- *Flexibilität* ist die Fähigkeit eines Systems sich proaktiv und reaktiv, mit geringem Aufwand an kurzfristig ändernde Anforderungen innerhalb vorgehaltener Korridore anzupassen (Seebacher et al. 2014, S. 341; Erlach 2020, S. 314).
- *Wandlungsfähigkeit* beschreibt die Fähigkeit eines Systems, eine Veränderung des Systems jenseits vorgehaltener Korridore, jedoch innerhalb bereits vorgedachter Bereiche, mit relativ geringem Aufwand proaktiv oder reaktiv durchführen zu können. (Westkämper et al. 2000b, S. 25 vgl. Wiendahl et al. 2014, S. 128–130; Wochinger et al. 2013, S. 61, zur grafischen Abgrenzung von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität vgl. Heinen et al. 2008, S. 25; Zäh et al. 2005)
- *Agilität* beschreibt die Fähigkeit eines Systems, sich an noch unvorhergesehene Anforderungen außerhalb bereits vorgedachter Korridore mit relativ geringem Aufwand anpassen zu können. Sie stellt die höchste Form der Veränderungsfähigkeit dar. (Seebacher 2013, S. 17–18; Schönsleben 2020, S. 45)

Für die Arbeit ist insbesondere die Analyse der Flexibilität von Bedeutung. Daher ist eine weitere Unterscheidung der Flexibilitätsarten sinnvoll (vgl. Patzak 1982, S. 28; Upton 1995, S. 207; Browne et al. 1984; Seebacher 2013, Abs. 2.1). Slack et al. (2013, S. 52) unterscheiden vier Arten der Flexibilität:

- *Produktflexibilität* ist die Fähigkeit des Systems, neue Produkte hervorzubringen.
- Die *Mixflexibilität* ist die Fähigkeit, eine hohe Produktvielfalt produzieren zu können.
- *Mengenflexibilität* ist die Fähigkeit, unterschiedliche Mengen einzelner Produkte pro Periode herstellen zu können.
- Abschließend ist *Lieferflexibilität* die Anpassungsfähigkeit der zeitlichen Leistungserbringung.

Aufgrund des Betrachtungsbereichs der Arbeit sind insbesondere die letzten drei Flexibilitätsarten von Bedeutung. Die Produktflexibilität liegt außerhalb des Betrachtungsbereichs der Arbeit.

#### **2.2.4 Besonderheiten komplexer adaptiver Systeme**

Bei der Systemanalyse gilt es, die relevanten Besonderheiten komplexer adaptiver Systeme zu berücksichtigen. Anhand der Anzahl und Diversität sowie der Dynamik der Objekte und ihrer Wechselwirkungen sind vier grundsätzliche Systemtypen unterscheidbar (Haberfellner et al. 2015, S. 37–39; Cilliers 1998, S. 3):

- *Einfache Systeme* bestehen aus wenigen Objekten und weisen eine geringe Dynamik auf.
- *Massiv vernetzte, komplizierte Systeme* zeichnen sich durch hohe Diversität der Objekte und eine geringe oder vorhersagbare Dynamik aus.
- *Dynamische, komplizierte Systeme* besitzen trotz einer geringen Anzahl an Objekten ein dynamisches oder nicht vorhersagbares Systemverhalten (häufig hervorgerufen durch nichtlineare Wechselwirkungen).

- *Komplexe Systeme* lassen sich aufgrund der hohen Anzahl und Diversität der Objekte sowie der hohen Dynamik sowohl in der Struktur als auch im Verhalten nicht mehr vollständig durch Modelle beschreiben.

Eine besondere Form der komplexen Systeme sind komplexe adaptive Systeme. Reale Produkt-Produktionssystemen sind insbesondere aufgrund der Austauschbeziehungen mit der Umwelt häufig komplexe adaptive Systeme, weshalb diese nachfolgend näher beschrieben werden (Wiendahl 2011, S. 47; Wiendahl et al. 2014, S. 133). Bereits die Vielfalt der vorhandenen Definitionen und Ansätze zeigen die Herausforderung, solche Systeme zu erfassen: *Komplexe adaptive Systeme* (complex adaptive systems, CAS) können als Systeme mit einer Vielzahl häufig nichtlinear interagierender Elemente verstanden werden, die sich stets in und mit ihrer Umwelt entwickeln. (Simon 1962, S. 468; Holland 1992, S. 19; Cilliers 1998, S. 2; Gell-Mann 1999, S. 18; Riedl 2000, S. 3–4; Stüttgen 2003, S. 16, S. 42; Holland 2006, S. 1)

Die Notwendigkeit der Systemkomplexität lässt sich aus Ashbys „law of requisite variety“ (Ashby 1957, S. 206) ableiten. So muss ein Kontrollsystem mindestens die gleiche Fähigkeit zur Varietät (als kybernetischem Maß der Komplexität) aufweisen, wie das von ihm zu kontrollierende System, um dieses adäquat kontrollieren zu können (Ashby 1957, S. 206–207; Beer 1970, S. 246). Anders ausgedrückt kann ein System gegenüber seiner Umwelt nur bestehen, wenn es die notwendige Reaktionsvariabilität aufweist (Patzak 1982, S. 27).

CAS besitzen eine Reihe besonderer Eigenschaften. Die Darstellung der Eigenschaften basiert auf den Arbeiten von Simon (1962), Holland (1992), Cilliers (1998, S. 3–5), Gell-Mann (1999, S. 18) sowie Riedl (2000, S. 1–8) und ist anhand der vier in Bild 2.6 dargestellten Aspekte gegliedert.

**Struktur:** CAS bestehen aus einer Vielzahl an Elementen, wobei es sich häufig um gleiche (redundante) oder ähnliche (polymorphe) Elemente handelt. Die Elemente sind auf vielfältige Weise miteinander verbunden. Trotz der Vielzahl der Verbindungen sind zur hinreichend genauen Beschreibung des Systems häufig nur wenige der Verbindungen relevant

(empty world hypothesis). (Simon 1962, 468, 478; Holland 1992, S. 19; Cilliers 1998, S. 3–4; Riedl 2000, S. 5–6)

**Hierarchie:** Zentrale Eigenschaft eines durch den Menschen erfassbaren CAS ist dessen hierarchische, in der Regel lose gekoppelte Struktur (near decomposability). Die Interaktion zwischen Elementen innerhalb derselben Hierarchieebene ist dabei stärker als zwischen unterschiedlichen Hierarchieebenen. Das offene System befindet sich in Interaktion mit seiner Umgebung und in einem Fließgleichgewicht zwischen Ordnung und Chaos (vgl. auch Exploitation und Exploration). Die zum Aufbau der Ordnung notwendige Energie erhält das System aus seiner Umwelt (Entropie-Export). (Simon 1962, S. 467–477; Holland 1992, S. 19, 26; Cilliers 1998, S. 4; Riedl 2000, S. 4–5)

**Funktion:** Die Elemente eines CAS interagieren parallel und in nicht linearer Weise miteinander. Entscheidungen werden häufig ohne zentrale Instanz durch die einzelnen Elemente anhand von Heuristiken getroffen. Die Steuerung erfolgt über Regelkreise erster und zweiter Ordnung mit positiver und negativer Kopplung (Homöostase). Zur Entstehung von Hierarchien (und komplexen Strukturen) bedarf es einer gewissen Stabilität und Zuverlässigkeit der einzelnen Elemente (building blocks) (Simon 1962, 467, 473; Holland 1992, S. 21–25; Cilliers 1998, S. 4; Gell-Mann 1999, S. 18–19)

**Entwicklung:** Die Elemente eines CAS passen sich anhand individueller Ziele sowie zufällig an die Umwelt an. Die dadurch entstehenden Zustände sind oft weit entfernt von einem optimalen Zustand. Die Definition eines Optimums in einer sich stets verändernden Umwelt ist zudem grundsätzlich fraglich. Sich nicht verändernde, zuverlässige Elemente, die keinen Engpass darstellen, sind aus Analysesicht von geringerer Relevanz. Die Anpassung an die Umwelt erfolgt über Reproduktion von Elementen und Adaption existierender Elemente am Rande des Chaos (edge of chaos). Die Adaption der Elemente erfolgt dabei nicht nur reaktiv anhand der Rückkopplung, sondern auch antizipativ anhand einer internen Abbildung über das (prognostizierte) System. Ein solches Abbild (internal model/schema) muss dabei nicht zwingend korrekt sein bzw. eintreten. Die Veränderungen eines Elements basieren auf den vorhergehenden Erfahrungen des Systems (Historizität bzw. Pfadabhängigkeit). Es kann innerhalb des Systems zu nicht reversiblen Veränderun-



gen kommen (Phasenübergang). In Summe können die Veränderungen so zu unvorhergesehene Systemeigenschaften (Emergenz) führen. (Simon 1962, S. 468–480; Holland 1992, S. 19–25; Cilliers 1998, S. 4; Gell-Mann 1999, S. 18–19; Riedl 2000, S. 4)

Ein geeignetes Analyseverfahren berücksichtigt die Besonderheiten des untersuchten komplexen adaptiven Systems. So kann der Aufwand zur Identifikation der relevanten Elemente innerhalb des Systems trotz der Komplexität reduziert werden.

## 2.3 Systems Engineering als Methode der Systemgestaltung

Ziel der zu entwickelnden Methode ist es, anhand der Analyseergebnisse geeignete Maßnahmen zur Beeinflussung des Systems ableiten zu können (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 1). Um eine zielgerichtete Analyse durchführen zu können, ist es notwendig, die Grundlagen der an die Analyse anschließenden Systemgestaltung zu kennen. Der Abschnitt erläutert daher zunächst die relevanten Paradigmen der Systemgestaltung. Anschließend stellt er das für die Arbeit relevante Vorgehensmodell des Systems Engineering sowie geeignete Methoden zur Systemgestaltung vor.

### 2.3.1 Paradigmen der Systemgestaltung

Die Paradigmen der Systemgestaltung lassen sich hinsichtlich ihres Umgangs mit Komplexität in klassische und komplexitätsorientierte Ansätze unterscheiden. (Minai et al. 2006)

Grundsätzliches Prinzip der *klassischen Gestaltungsansätze* ist es, Systeme zu entwerfen, die sich gut an wechselnde oder geänderte Umweltbedingungen anpassen lassen oder die robust gegenüber solchen Änderungen sind. Dieses klassische Paradigma ist erfolgreich und sinnvoll. Es sollte für Systeme geringerer Komplexität weiter eingesetzt werden. (Bar-Yam 2006, S. 36)

Klassischen Ansätzen gehen in der Regel von ausreichend genau spezifizierbaren Systemanforderungen aus. Darauf aufbauend lässt sich unter Zuhilfenahme eines phasenorientierten Vorgehens sowie eines Problemlösungsmodells ein funktionsfähiges System schaffen. Zentrale Eigenschaften eines solchen Systems sind Stabilität, Vorhersagbarkeit,

Zuverlässigkeit, Transparenz und Kontrollierbarkeit (Minai et al. 2006, S. 8). Gestaltungsmethoden, die diesem Ansatz zugeordnet werden können, sind unter anderem das Systems Engineering (Haberfellner et al. 2015), die Systemtechnik (Patzak 1982) und Systems Architecture (Crawley et al. 2016).

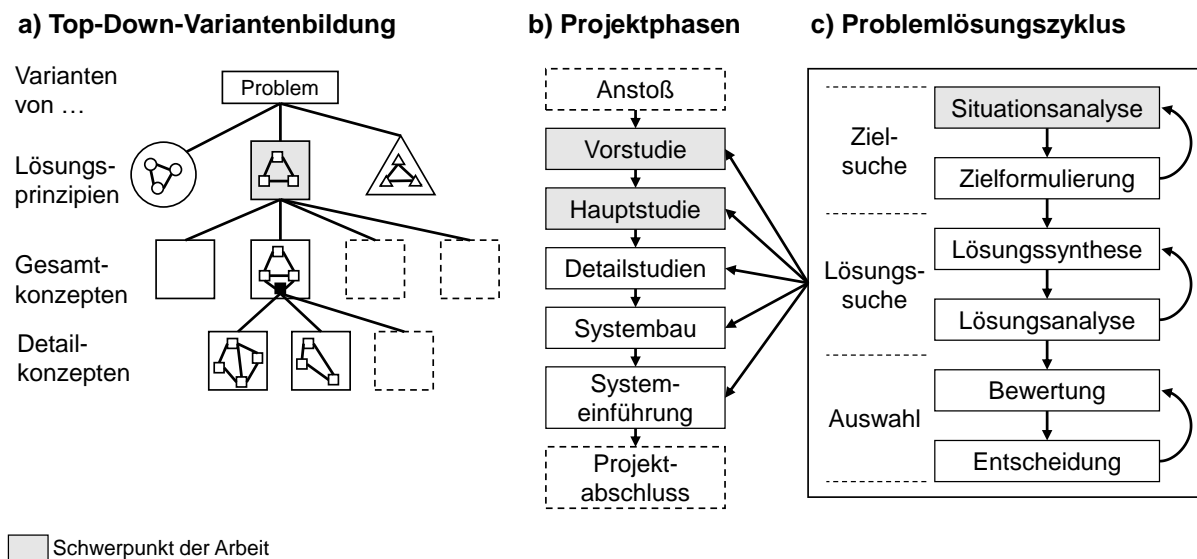
In offenen Umwelten mit unvorhersehbaren Ereignissen stoßen klassische Ansätze an Grenzen, da die Anpassung an unvorhersehbare Ereignisse nicht a-priori spezifizierbar und somit nur schwer gestaltbar ist (Minai et al. 2006, S. 9). *Komplexitätsorientierte Gestaltungsansätze* berücksichtigen diese Unmöglichkeit der vollständigen Spezifikation der Anforderungen. Prinzip dieser Ansätze ist es, Voraussetzungen im gestalteten System zu schaffen, sodass sich dieses mit seiner komplexen Umwelt entwickeln kann. Die in klassischen Ansätzen vorherrschende Trennung von Systemgestaltung und Systembetrieb wird grundsätzlich in Frage gestellt. (Bar-Yam 2006, S. 22; Jones 2014)

Die Ansätze zur Gestaltung komplexer adaptiver Systeme zielen darauf ab, eine Umwelt zu schaffen, die u.a. Adaption, Wandel und Neuartigkeit begünstigt, anstatt ein System vollständig zu gestalten (Minai et al. 2006, S. 9). Ansätze, die auf dem komplexitätsorientierten Paradigma basieren, sind unter anderem das Complex System Engineering (Braha 2006) und der Ansatz zur Nutzung von Komplexität (Axelrod et al. 2000, S. 9). Ein Ansatz mit Schwerpunkt auf soziologischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten komplexer Systeme ist die St. Galler Managementlehre (Ulrich et al. 1995).

Klassische Ansätze beinhalten häufig komplexitätsorientierte Elemente; fundamentaler Unterschied ist jedoch die top-down ausgerichtete Logik der klassischen Ansätze gegenüber der evolutionär ausgerichteten Logik der komplexitätsorientierten Ansätze (Minai et al. 2006, S. 5). Ein einzelnes Produkt-Produktionssystem weist, verglichen mit Volkswirtschaften, biologischen Systemen oder auch einem Produktionsnetzwerk, eine geringe Komplexität auf. Zudem lassen sich die Anforderungen an ein solches Produkt-Produktionssystem zumindest kurz- und mittelfristig relativ genau spezifizieren. Die vorliegende Arbeit legt daher im Allgemeinen das Paradigma des klassischen Gestaltungsansatzes zugrunde. In Grenzfällen, d.h. in Bereichen mit hoher Komplexität oder a-priori nicht genau spezifizierbaren Anforderungen, werden zusätzlich die Besonderheiten der komplexitätsorientierten Gestaltungsansätze berücksichtigt.

### 2.3.2 Vorgehensmodell des Systems Engineering

Zur systematischen Analyse eines komplexen Systems ist ein geeignetes Vorgehen notwendig. Aufgrund der Verbreitung in der Fabrik- und Produktionsplanung orientiert sich das weitere Vorgehen am Systems Engineering, welches im Folgenden detailliert wird. (Haberfellner et al. 2015, vgl. Erlach et al. 2021)



**Bild 2.8** Grundprinzipien des Systems Engineering (nach Haberfellner et al. 2015, S. 83)

Das dem Systems Engineering zugrundeliegende Systemdenken und das davon abgeleitete Vorgehensmodell basieren auf vier Grundgedanken bzw. *Prinzipien* (Bild 2.8, Haberfellner et al. 2015, S. 55–82; Wiendahl 2011, S. 48–50):

- Das Prinzip „*vom Groben zum Feinen*“ fasst die Ideen des systemhierarchischen Denkens sowie der zunehmenden Detaillierung ausgehend von Blackbox- hin zu Whitebox-Elementen zusammen. (Bild 2.8a)
- Das Prinzip der *Variantenbildung* unterstützt bei der systematischen Entwicklung grundsätzlich alternativer Lösungsprinzipien bzw. Systemarchitekturen, um nicht ausschließlich die erstbeste Lösungsidee weiterzuverfolgen sowie die später bevorzugte Variante begründet auswählen zu können. (Bild 2.8a)
- Die Aufteilung in logisch sowie zeitlich voneinander getrennte Phasen konkretisiert die beiden oberen Prinzipien durch eine *Makro-Logik*, um den Prozess in handhabbare

Abschnitte zu gliedern. Dabei werden die Lebensphasen des Systems sowie die Projektphasen zur Entwicklung und Realisierung des Systems unterschieden. (Bild 2.8b)

- Der Problemlösungszyklus als *Mikro-Logik* dient zur Anwendung bei allen Problemen, unabhängig von der aktuellen Projektphase. Er ist grob gegliedert in Zielsuche, Lösungssuche und Auswahl. (Bild 2.8c)

Ziel der Arbeit ist die aufwandsarme Analyse einer bestehenden wertstromorientierten Variantenfertigung, um grundsätzliche Ursachen der Dispositionskomplexität zu identifizieren. Aufgrund des heuristischen Ansatzes der Arbeit liegt der Schwerpunkt bei der Variantenbildung auf den zugrundeliegenden Lösungsprinzipien. Die Projektphasen Vor- und Hauptstudie des System Engineering stehen im Fokus des Vorgehens. Innerhalb des in jeder Phase zu durchlaufenden Problemlösungszyklus liegt der Schwerpunkt auf der Situationsanalyse.

Der in Bild 2.8c dargestellte Problemlösungszyklus basiert auf dem Dewey'schen Problemlösungsmodell, das zwischen zwei Extremformen liegt (Haberfellner et al. 2015, S. 80–82; Nadler 1969, S. 25):

- *Ist-zustandsorientierte Modelle* leiten aus einer Ist-Analyse Schwachstellen ab und entwickeln daraus einen Soll-Zustand. Bei diesem Vorgehen bleibt grundsätzlich fraglich, wie Schwachstellen identifiziert werden bzw. woran sich diese messen lassen. Ein möglicher Vergleichsmaßstab in Form eines Soll-Zustandes wird schließlich erst nach der Schwachstellenanalyse entwickelt.
- *Soll-zustandsorientierte Modelle* hingegen entwickeln anhand einer kurzen Zustandsbeschreibung ein Idealkonzept und reduzieren die Analyse der Ist-Situation auf ein Minimum. Fehlen beim Entwurf des Idealkonzepts kritische Faktoren, stellt dies insbesondere die Umsetzung des Konzepts vor zahlreiche Probleme. Hervorzuheben ist bei soll-zustandsorientierten Modellen jedoch die systematisch und zielgerichtet ablaufende Analyse. Sie kann sich auf die Analyse der Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand beschränken.

Aufgrund der höheren Effizienz bei der Analyse legt sich diese Arbeit auf ein soll-zustandsorientiertes Analyseverfahren fest. Ein solches Vorgehen anhand von Idealkonzepten wird

beispielsweise auch bei der Gestaltung von Fabrikstrukturen und Wertströmen eingesetzt (VDI 5200 Blatt 1, S. 13; Erlach 2020, Kap. 3).

### 2.3.3 Ausgewählte Methoden der Systemgestaltung

Soll-zustandsorientierte Analysen konzentrieren sich auf die Identifikation von Abweichungen eines Ist-Zustands zu einem Idealkonzept. Der Abschnitt zeigt daher Methoden zum Entwurf eines solchen Idealkonzepts auf.

Innerhalb des System Engineering durchläuft die Systemgestaltung die Schritte Architektur- und Konzeptgestaltung. Die Systemarchitektur beschreibt das zugrundeliegende Lösungsprinzip des zu entwerfenden Systems. Die nicht näher betrachtete Konzeptgestaltung beschreibt dessen Detaillierung. Beiden Schritten liegt jeweils die Logik des Problemlösungszyklus zugrunde (Bild 2.8c). Aufgrund der großen Tragweite für das zu gestaltende System wird die Auswahl des Lösungsprinzips nachfolgend detailliert. Das Lösungsprinzip zur Gestaltung des Produkt-Produktionssystems kann als *Rahmenkonzept* bezeichnet werden. (Haberfellner et al. 2015, 27, 65, 193; Erlach et al. 2021, S. 41)

„[Als Rahmenkonzept] wird die Allokation von Funktionen auf Elemente, die Anordnung dieser Elemente in einer Struktur, inkl. der Definition der Schnittstellen zwischen diesen Elementen und zur Systemumwelt, zur Erzeugung eines definierten Werts [bezeichnet].“ (Haberfellner et al. 2015, S. 182, vgl. Crawley et al. 2016, S. 124; Ulrich 1995, S. 420) Die zunehmenden Anforderungen an zu gestaltende Systeme erschwert die intuitive Gestaltung geeigneter Rahmenkonzepte (Haberfellner et al. 2015, S. 186). Nachfolgend werden daher Heuristiken und Gestaltungsrichtlinien als Methoden zum Entwurf von Rahmenkonzepten vorgestellt.

„Eine Heuristik ist ein nicht-willkürliches Verfahren, um auf Grundlage einer Reduktion des Problemlösungsaufwands aus unvollständiger Information vernünftige Schlüsse zu ziehen, das aber keine Lösung garantieren kann.“ (Powalla 2010, S. 18)

Aufgrund der umfangreichen Aufgabenstellungen ist die Anwendung von Heuristiken durch menschliche Entscheider bei Gestaltungsaufgaben notwendig und typisch. Die Verhaltensökonomie untersucht die damit zusammenhängende begrenzte Rationalität (bounded rationality) sowie die entstehenden Denk- und Entscheidungsfehler, aber auch

die Nützlichkeit solcher Heuristiken. (vgl. Simon 1955, 1956; Kahneman 2012; Gigerenzer 2015). Auch die Betriebswirtschaftslehre setzt bei eher mathematisch-technisch geprägten Problemstellungen Heuristiken zur Lösung von Planungs- und Entscheidungsproblemen (operations research) ein. Die Reduktion des Aufwands bei gleichzeitig ausreichender Lösungsgüte wird unter anderem durch die Berücksichtigung der Problemstruktur erreicht. (Domschke et al. 2010, S. 21; Klein et al. 2011)

Bei der Gestaltung von (technischen) Systemen werden häufig auf Heuristiken aufbauende Empfehlungen und Vorgaben eingesetzt. Solche Empfehlungen und Vorgaben finden beispielsweise in der Konstruktionstechnik (Feldhusen et al. 2013, Kap. 11–13) oder bei der Gestaltung einer schlanken Produktion (Erlach 2020, Kap. 3) Anwendung. Sie lassen sich nach Erlach et al. (2020, S. 79–80) in drei Gestaltungsebenen untergliedern:

- *Gestaltungsprinzipien* sind die immer einzuhaltenden Grundideen der Systemgestaltung. Sie geben jedoch keinen konkreten Anhaltspunkt für die Gestaltung vor. (z.B. das Gestaltungsprinzip „kundenorientiert“)
- Mit Hilfe eines Sets an *Gestaltungsrichtlinien* kann die Ideallösung für eine Gestaltungsaufgabe vollständig entworfen werden. Das Anwenden der Gestaltungsrichtlinien setzt eine Priorisierung konfliktbehafteter Zieldimensionen voraus. (z.B. Ausrichtung der Prozesse am Kundentakt)
- *Gestaltungsregeln* geben Handlungsanweisungen zur detaillierten Ausgestaltung eines technischen Systems. (z.B. Berechnungsvorschriften zur Auslegung eines Kanban-Regelkreises)

Aufgrund ihrer Vollständigkeit, des Abstraktionsgrades sowie der Orientierung an einer Ideallösung eignet sich ein Set an Gestaltungsrichtlinien besonders für den Entwurf eines Rahmenkonzepts und darauf aufbauend des Idealsystems (vgl. Erlach et al. 2020, S. 79–80). Die in dieser Arbeit zu entwickelnden günstigen Systemeigenschaften sind angelehnt an die Gestaltungsrichtlinien.

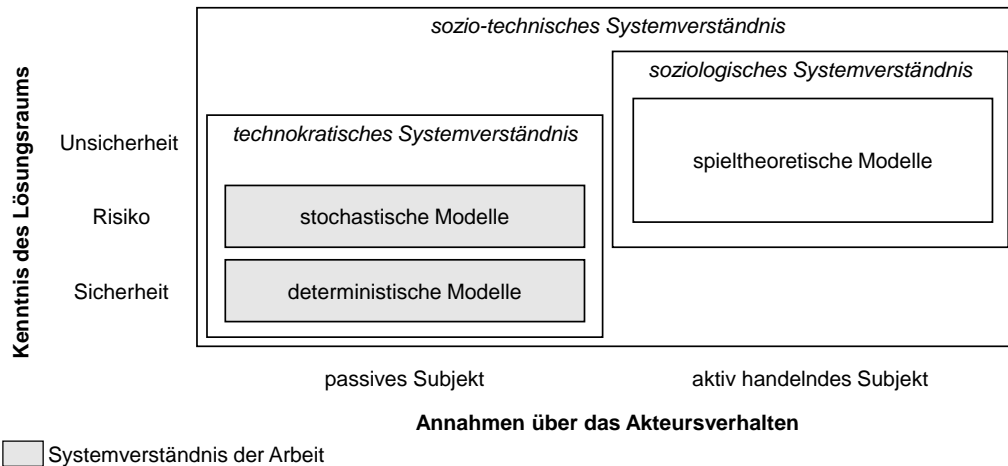
## 2.4 Techniken der quantitativen Analyse

Neben den theoretischen Grundlagen der Systemtheorie und -gestaltung sind zur quantitativen Analyse komplexer Produkt-Produktionssysteme weitere Methoden notwendig. Dazu gilt es zunächst, eine geeignete Modellierung zur Abbildung komplexer Produkt-Produktionssysteme auszuwählen und diese anschließend zu detaillieren. Darauf aufbauend werden die Techniken zur Abbildung von Struktur und Verhalten sowie zur Visualisierung der Ergebnisse dargestellt.

### 2.4.1 Heuristische Beschreibungs- und Erklärungsmodelle

Modelle sind nach Stachowiak (1973, S. 131–134) durch drei Merkmale gekennzeichnet. Erstens bilden Modelle Originale ab oder repräsentieren diese (Abbildungsmerkmal). Zweitens erfassen Modelle nicht alle Attribute des repräsentierten Originals, sondern nur die, die für Modellbildner und -verwender relevant erscheinen (Verkürzungsmerkmal). Drittens ersetzen Modelle ihre Originale für jemanden, einen Menschen oder künstlichen Modellbenutzer zu einem bestimmten Zweck oder Ziel und sind innerhalb bestimmter Zeitintervalle gültig (pragmatisches Merkmal). (vgl. Wiendahl 2011, S. 34)

Modelle lassen sich nach ihrem Einsatzzweck, der Art der Information und der Abstraktion unterscheiden (Scholl 2008, S. 36–37; Jockisch et al. 2009, S. 38) Für sozio-technische Systeme ist zudem die Einteilung anhand des Akteursverhaltens in stochastische, deterministische und spieltheoretische Modelle relevant (Bild 2.9b; Wiendahl 2011, S. 32). Für eine ausführliche Darstellung der Modellarten sei auf Jockisch et al. (2009) und Wiendahl (2011, S. 28–33) verwiesen.



**Bild 2.9** Systemverständnis der Arbeit (anhand der Modellklassifikation nach Wiendahl 2011, S. 32)

Aufgrund der gesetzten Ziele verwendet die Arbeit partielle dynamische Beschreibungs- und Erklärungsmodelle, die vorwiegend quantitative Informationen darstellen. Der Arbeit liegt ein sozio-technisches Systemverständnis mit handelnden Subjekten zugrunde. Aufgrund der quantitativen Ausrichtung bilden jedoch technokratische beschreib- und erklär-bare Systemeigenschaften den Schwerpunkt. (Wiendahl 2011, S. 32; Töllner et al. 2009, S. 12)

Beschreibungs- und Erklärungsmodelle im Bereich der *Komplexitätsanalyse* lassen sich anhand ihrer theoretischen Grundlagen einordnen: Zu den Grundlagen zählen unter anderem die Chaostheorie, die Theorie der nichtlinearen Dynamik, die Informationstheorie sowie Heuristiken und die Graphentheorie. Zudem existieren hybride Methoden, die mehrere der theoretischen Ansätze kombinieren (z.B. Indizierung kombiniert mit Entropie) sowie Ansätze, die sich noch in einer frühen Phase befinden oder nur geringer Anwendbarkeit innerhalb der Produktion besitzen (z.B. Software-Metriken). Viele der Methoden stellen hohe Anforderungen an die Datenqualität oder liefern für die Praxis wenig aussagekräftige Kennzahlen. (Efthymiou et al. 2016, 1034–1035, 1040, vgl. ausführlich Alkan et al. 2018, S. 130; Efthymiou et al. 2016, S. 1028) Aufgrund der geforderten hohen Praxisnähe konzentriert sich die vorliegende Arbeit für die Beschreibung und Erklärung des Systems auf heuristische Modelle (vgl. Alkan et al. 2018, S. 136).



Eine heuristische Systembeschreibung nutzt die Eigenschaften des zu untersuchenden komplexen Systems aus: Aufgrund der Redundanz und Polymorphie der Elemente muss nicht jedes Element der Systemstruktur vollständig beschrieben werden. Es genügen Referenzen und die Beschreibung der Unterschiede. Um das grundsätzliche Systemverhalten zu untersuchen, müssen nicht alle Interaktionen, sondern nur die wenigen relevanten Interaktionen betrachtet werden. (Abs. 2.3.3, Simon 1962, S. 477–478)

Um bei der Verwendung von Heuristiken einer zu stark vereinfachenden, naiven Anwendung vorzubeugen, benötigen diese ein theoretisches Fundament (Efthymiou et al. 2016, S. 1040). Kapitel 3 stellt dieses anhand eines Grundmodells bereit.

## 2.4.2 Modellierung der Systemstruktur

Umfangreiche Systeme besitzen häufig eine Vielzahl an ähnlichen Objekten. Um die grundsätzliche Struktur in einem solchen System zu beschreiben, sollten ähnliche Objekte zunächst unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien zusammengefasst werden. Die vorliegende Arbeit verwendet Mengen bzw. Sets, um die Zusammenfassung mehrerer Objekte abzubilden. Ein Klassifikationssystem bietet die Möglichkeit, Objekte eindeutig einer solchen Menge zuzuordnen.

### **Mengen**

Nicht geordnete, jeweils anhand eines eindeutigen Merkmals identifizierbare Objekte lassen sich als mathematische Menge bzw. als ein Objekt vom Datentyp Set (set) bzw. Wörterbuch (dictionary) abbilden (Ottmann et al. 2017, S. 48; McKinney 2014, S. 416). Die Arbeit unterscheidet drei *Arten der Mengenbildung*:

1. Mengenbildung anhand (fester) *Attributwerte* der Objekte: Dies kann anhand eines Klassifikationssystems erfolgen. Beispiel ist die Menge aller Artikel, deren Gewicht größer 5 kg ist, oder die Menge aller Artikel, deren Material Kunststoff ist.
2. Mengenbildung anhand der *relativen Position* eines Objekts zu anderen Objekten einer Obermenge (superset): Dazu werden die Objekte anhand eines Attributs gewichtet und sortiert. Bekanntes Beispiel ist die ABC-Klassifizierung basierend auf dem Pareto-Prinzip. (Schönsleben 2020, S. 455–456)

3. Mengenbildung anhand der *Assoziation* der betrachteten Objekte zu anderen Objekten: Zur Beschreibung und Lösung dieser Fragestellungen kann die Graphentheorie eingesetzt werden, die Objekte und ihre Assoziationen als Knoten und Kanten modelliert. Beispielsweise werden alle Artikel, die eine bestimmte Maschine bearbeitet, zu einer Menge zusammengefasst. (Ottmann et al. 2017, S. 429, vgl. Diestel 2006; Caldarelli et al. 2016)

Insbesondere in der Variantenfertigung stellt die geeignete Klassifikation eine Herausforderung in der Analyse dar (vgl. Erlach 2020, Abs. 2.1). Der folgende Abschnitt detailliert die Klassifikation daher.

### ***Klassifikation und Familienbildung***

Die vorgestellten Möglichkeiten zur Mengenbildung dienen dazu, ähnliche Objekte zusammenzufassen. Ein Klassifikationssystem erlaubt es, die Regeln für die Mengenbildung systematisch darzustellen und die Objekte eines Systems in einer Hierarchie abzubilden (vgl. Abs. 2.2.2). Beim Einsatz unterschiedlicher Klassifikationssysteme können sich überlagernde, nicht deckungsgleiche Ordnungen entstehen. Beispielsweise ist ein Arbeitssystem sowohl nach der Art der durchgeführten Arbeitsgänge als auch nach den produzierten Artikeln klassifizierbar. (Haberfellner et al. 2015, 37, 44–45; Simon 1962, S. 468; Riedl 2000, 87, 91; Patzak 1982, S. 39–54)

Um ein System strukturiert analysieren zu können, sollten die zu untersuchenden Objekte anhand ihrer Eigenschaften bzw. ihrer Hierarchiezugehörigkeit zumindest vorläufig in einer alle Eigenschaften abwägenden Hierarchie *eindeutig geordnet* werden. Angelehnt an das Wertstromdesign heißt dieser Vorgang *Familienbildung*. Bei der Top-down-Familienbildung handelt es sich um eine Klassifizierung von Objekten anhand festgelegter Kriterien. Für jede Familie wird zusätzlich ein typischer Vertreter, der sogenannte *Repräsentant*, ausgewählt. (Erlach 2020, S. 38–45; Jockisch et al. 2009, S. 25–26; Schönsleben 2020, S. 28)

Die Wahl eines Repräsentanten beschleunigt die Modellierung deutlich. So kann ein erstes Modell beispielsweise nur die für den Repräsentanten benötigten Arbeitssysteme darstellen. Ein solches Abbild ist dann ggf. für die Familie unvollständig, bildet jedoch den im Fokus stehenden Repräsentanten vollständig ab und kann iterativ erweitert werden.

### 2.4.3 Modellierung des Systemverhaltens

Um das Systemverhalten detailliert analysieren zu können, sollten die vergangenen, aktuellen und idealerweise sogar die zukünftigen (geplanten, erwarteten) Systemzustände vorliegen. Die Aufzeichnung der Systemzustände und damit implizit des Systemverhaltens erfolgt in dieser Arbeit über Zeitreihen. Ursache-Wirkungs-Diagramme stellen die grundsätzlichen Einflüsse auf das Systemverhalten schrittweise prüfbar dar.

#### ***Verhaltensbeschreibung durch Zeitreihen***

Zeitreihen bieten eine einfache Möglichkeit, das vergangene sowie das prognostizierte zukünftige Verhalten eines (komplexen) Systems darzustellen (Gell-Mann 1999, S. 18). Zudem besitzen sie hohe Relevanz und Verbreitung im Produktionsmanagement. (Schönsleben 2020, S. 407–408; McKinney 2014, S. 289)

Eine *Zeitreihe* besteht aus endlich vielen, zeitlich aufsteigend angeordneten Messwerten. Sie ist univariat, wenn zu jedem Zeitpunkt eine Beobachtung vorliegt und multivariat, wenn zu jedem Zeitpunkt mehrere Beobachtungen vorliegen. (Deistler et al. 2018, S. 1–2)

Ein *Zeitpunkt* (Termin, timestamp) ist ein exakter festgesetzter Punkt, üblicherweise ausgedrückt durch Datum und Uhrzeit. Ein *Zeitraum* (Zeitperiode, timespan, interval) ist ein Bereich zwischen einem *Start-* und *Endzeitpunkt*. Eine *Periode* (period) beschreibt den Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten. Der Kehrwert der Periodenlänge ist die *Abtastrate* (Frequenz, sampling rate, frequency). Je höher die Abtastrate, desto feiner die Granularität der Analyse. (Schönsleben 2020, S. 23–24; McKinney 2014, S. 289)

Beziehen sich die Messwerte auf einen Zeitpunkt, spricht man von *Bestandsgrößen* (z.B. Lagerbestand um 10 Uhr). Beziehen sich die Werte hingegen auf einen Zeitraum (bzw.

eine Periode) spricht man von *Flussgrößen* oder *Stromgrößen* (z.B. produzierte Menge zwischen 11 und 12 Uhr). (Backhaus et al. 2018, S. 126; Dyckhoff 2006, S. 26–27)

Die Messwerte einer Zeitreihe werden zu diskreten Zeitpunkten erfasst. Bei *äquidistanten Zeitreihen* sind alle Perioden exakt gleich lang (z.B. stündliche Abtastung). In der Praxis treten häufig *periodische Zeitreihen* auf, bei denen die Perioden nicht exakt gleich lang sind, jedoch einem bekannten Muster folgen (z.B. monatliche Abtastung). Bei *ereignisbasierten Zeitreihen* ist kein Muster in der Periodenlänge erkennbar. (Deistler et al. 2018, S. 1–2; McKinney 2014, S. 289; Dyckhoff 2006, S. 26–27; Ungern-Sternberg et al. 2021, S. 278)

Innerbetrieblich werden periodischen Zeitreihen (z.B. Zeitreihe der Arbeitstage) häufig als äquidistante Zeitreihen betrachtet, um beispielsweise die Berechnung von Durchlaufzeiten zu vereinfachen. Insbesondere beim Vergleichen solcher Zeitreihen mit tatsächlich äquidistanten Zeitreihen (z.B. Zeitreihe der Kalendertage) oder mit anderen betrieblichen Zeitreihen (z.B. Zeitreihe der Arbeitstage in ausländischen Produktionsstätten) sind zusätzliche Prüfungen der repräsentierten Informationen notwendig. Die Umwandlung ereignisbezogener Zeitreihen mit langen Perioden in äquidistante oder periodische Zeitreihen führt häufig zu vermeintlichen Schwankungen. Beispielsweise werden große Aufträge oft nur in einer Periode verbucht, obwohl die Produktion über mehrere Perioden erfolgte. (Backhaus et al. 2018, S. 127; Schönsleben 2020, S. 540–541)

Für einen Messwert können unterschiedliche Zeitreihen erstellt werden. Für jede Zeitreihe eines Messwerts lässt sich, bezogen auf den (gregorianischen) Kalender, der Zeitpunkt der Messwerte sowie der Zeitpunkt der Erfassung angeben (vgl. Horváth et al. 2015, S. 202; Hichert et al. 2022, S. 110). Abhängig vom Aufnahmezeitpunkt lassen sich zwei relevante Fälle unterscheiden:

- Bei ex-post aufgenommenen Ist-Zeitreihen liegt der Zeitpunkt des Messwerts vor dem Zeitpunkt der Erfassung.
- Bei ex-ante erstellten Zeitreihen, wie beispielsweise einer Vorhersage- oder Soll-Zeitreihe, liegt der Zeitpunkt der Erfassung bzw. Erstellung vor dem Zeitpunkt des Messwerts.

In regelkreisbasierten Systemen werden die Vorhersage- und Soll-Szenarien regelmäßig aktualisiert sowie für Zeiträume in naher Zukunft detailliert, d.h. die Auflösung erhöht. Dies wird auch als *rollende oder rollierende Planung* bezeichnet. (vgl. Horváth et al. 2015, S. 90–91; Schönsleben 2020, S. 100, 242).

### **Verhaltensklärung durch Ursache-Wirkungs-Diagramme**

Ausgehend von der Zielstellung der Arbeit liegt der Schwerpunkt der Verhaltensanalyse auf der ursachenorientierten Betrachtung des Systemverhaltens. Diese Betrachtungsweise identifiziert, gliedert und prüft Symptome und ordnet sie möglichen Ursachen und ihren Hintergründen zu (Haberfellner et al. 2015, S. 73–74). Je konkreter einzelne Ursachen identifiziert und quantifiziert werden können, desto einfacher lassen sich daraus konkrete Handlungen zu deren Beeinflussung ableiten.

Zur vollständigen Abbildung und als Grundlage für weiterführende Simulationen können aufwändige Methoden wie beispielsweise das Sensitivitätsmodell oder System Dynamics verwendet werden (Haberfellner et al. 2015, S. 49, 200–202; Vester 2000). Um dem Anspruch an eine pragmatische Methode gerecht zu werden, verwendet die Arbeit Ursache-Wirkungs-Diagramme zur Abbildung des Systemverhaltens.

Ursache-Wirkungs-Diagramme (auch Fischgrat- oder Ishikawa-Diagramm) stellen mehrstufig vernetzte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge strukturiert dar. Aufgrund des hierarchischen Aufbaus eignet es sich insbesondere für die priorisierte und systematische Analyse der relevanten Einflussfaktoren. (Haberfellner et al. 2015, S. 200–202; Brüggemann et al. 2020, S. 23)

### **2.4.4 Visualisierung von Systemstruktur und -verhalten**

Ziel der zu entwickelnden Visualisierung ist es, komplexe Sachverhalte klar, präzise und effizient zu kommunizieren. Geeignete Visualisierungen helfen bei der „Bewältigung der Diskrepanz zwischen logisch-analytischem Entwickeln und ganzheitlichem Erkennen eines Systems.“ (Patzak 1982, S. 126) Beispielsweise gibt eine Landkarte die Distanzen zwischen einzelnen Orten maßstäblich korrekt wieder und unterstützt dabei die analytische Bewertung alternativer Wege. Andererseits unterstützt sie durch farbige Hervorhebungen

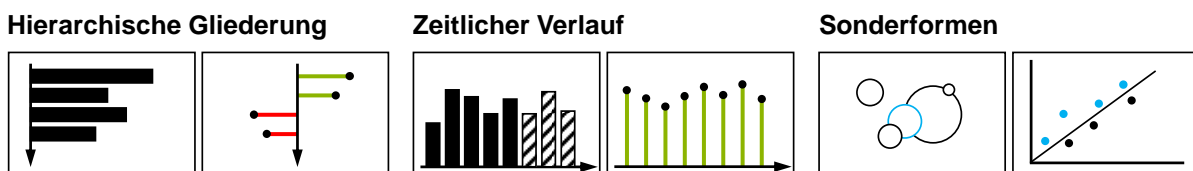
beim Erkennen von Gesamtzusammenhängen wie beispielsweise Wetterphänomenen an Bergketten.

Ein zentraler Aspekt der Visualisierung ist die Wahl einer geeigneten Notation. Sie definiert, wie die Darstellung zu erfolgen hat (Syntax) und welche Bedeutung die einzelnen Elemente besitzen (Semantik). (Tuftte 2001, S. 51; Balzert 1999, S. 545; Kohlhammer et al. 2018, S. 18–21) Die Visualisierung quantitativer Daten, die häufig in Form von Tabellen vorliegen, erfolgt in der Regel in Form von Diagrammen. Tuftte (2001) unterscheidet Diagramme nach gewähltem Koordinatensystem in räumliche, zeitliche, zeitlich-räumliche sowie abstrakte Darstellungen. Lose daran sowie an das systemhierarchische Denken angelehnt, unterscheidet diese Arbeit Detail- und Überblicksdarstellungen. (Haberfellner et al. 2015, S. 44–45; DIN EN ISO 10209, S. 65, 77)

### **Detaildarstellungen**

Detaildarstellungen beschränken sich oft auf die Darstellung eines Systemaspekts, bilden diesen jedoch hinreichend genau ab. Häufig ist die Syntax stark formalisiert und abstrakt. Dadurch sind die Darstellungen in einem großen Anwendungsgebiet einsetzbar. Aufgrund ihrer abstrakten Syntax hängt die Semantik vom dargestellten Systemaspekt ab. Kontextinformationen sind notwendig, um die Darstellung einordnen und bewerten zu können. Beispiele sind Darstellungen von Zeitreihen in Form von Linien- oder Balkendiagrammen. Aufgrund der hohen Formalisierung lassen sich diese gut automatisiert erzeugen. (Kohlhammer et al. 2018, Abs. 2.2; Unwin 2008)

Für die Detaildarstellungen verwendet die Arbeit die International Business Communications Standards (IBCS). Mit den IBCS stellen Hichert et al. (2022) ein umfassendes Konzept zur Visualisierung quantitativer Informationen im Geschäftsumfeld dar.



**Bild 2.10** Ausgewählte Diagramme der International Business Communications Standards (nach Hichert et al. 2022, S. 69)

Wie Bild 2.10 zeigt, unterscheiden die IBCS-Diagramme zur Darstellung von hierarchischen Gliederungen (z.B. der Absatzmengen nach Region), von zeitlichen Verläufen (z.B. Absatzmengen je Monat) sowie Sonderformen (z.B. Ordnung der Produktgruppen in einer Matrix). Die syntaktische Unterstützung zur Darstellung von absoluten und relativen Abweichungen ist bei den IBCS besonders hervorzuheben (Bild 2.10, 2., 4. von links). (vgl. Kohlhammer et al. 2018, S. 93, 100; Brinton 1914; Tuftte 2001) Insbesondere die konsistente und verständliche Darstellung von Abweichungen ist für regelkreisbasierte Systeme wie die Produktion von besonderer Bedeutung, da Handlungen in der Regel aufgrund von Abweichungen unternommen werden.

### **Überblicksdarstellungen**

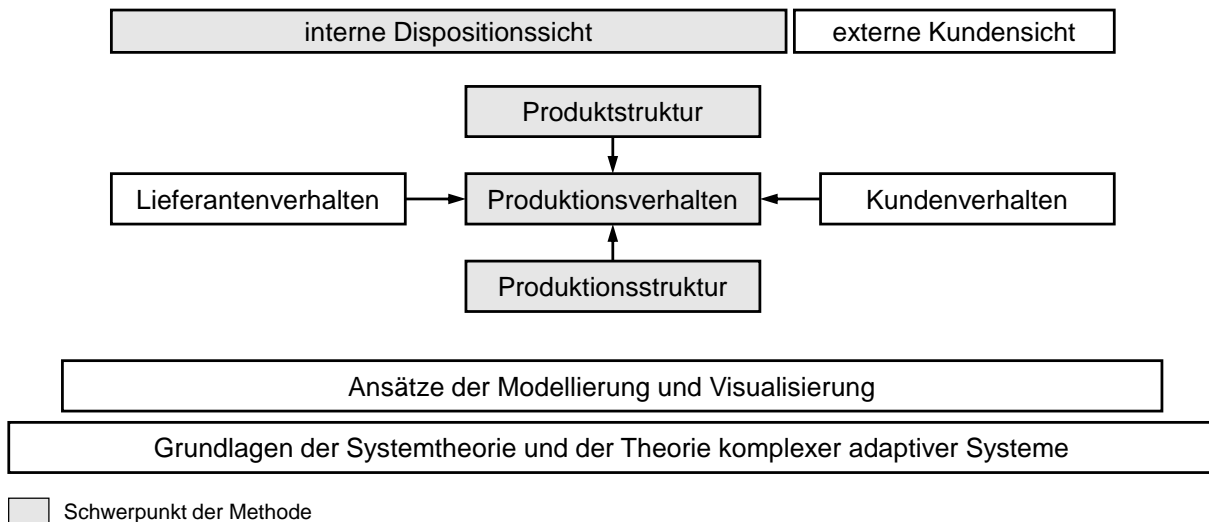
Überblicksdarstellungen, auch „rich pictures“ (Checkland 1975, S. 281) genannt, stellen mehrere Systemaspekte sowie deren grundsätzliches Zusammenwirken dar. Je nach Detailtiefe und Abstraktionsgrad werden Einzelheiten weggelassen oder idealisiert dargestellt. Solche Darstellungen verwenden häufig eine nicht vollständig formalisierte Syntax und eine umfangreiche Symbolik mit eindeutiger Semantik. Dies beschränkt die Einsetzbarkeit der Darstellungen in der Regel auf eine Anwendungsdomäne. Insbesondere bei Überblicksdarstellungen mit semi-formaler Syntax erfordert die Erstellung einen hohen manuellen Aufwand. (Berg et al. 2013; Checkland 1975, S. 281)

Die Wertstromdarstellung ist ein Beispiel für eine umfangreiche semi-formale Darstellung. Sie zeigt Produktionsprozesse sowie Material- und Informationsflüsse und verfügt über eine Vielzahl vordefinierter Symbole. (Bild 3.1; Erlach 2020, S. 101)

## 2.5 Ordnungsrahmen der Arbeit

Die vorhergehenden Abschnitte umrissen den Betrachtungsbereich der Arbeit und zeigten die theoretischen Grundlagen auf. Ein Ordnungsrahmen strukturiert die relevanten Elemente und deren Beziehungen innerhalb des Betrachtungsbereichs auf hoher Abstraktionsebene, um eine Übersicht zu schaffen. Die Übersicht unterstützt bei der Einordnung der zu entwickelnden Detaillierungen des Analyseverfahrens. (Meise 2001, S. 62; Nußbaum 2011, S. 105)

In der Arbeit werden zunächst die zu produzierenden Produkte und die dafür notwendige Produktion unterschieden. Ausgehend von den zentralen Aspekten eines Systems wird zwischen Struktur und Verhalten unterschieden (Bild 2.6). Anhand der zugrundeliegenden Handlungstheorie wird die logistische Zielerreichung aus interner Dispositionssicht und externer Kundensicht unterschieden.



**Bild 2.11** Ordnungsrahmen der Arbeit

Bild 2.11 zeigt die fünf sich daraus ergebenden, für die Arbeit relevanten Teilbereiche:

- Das *Produktionsverhalten* wirkt, beispielsweise über den Rückstand, unmittelbar auf die logistische Zielerreichung und steht daher im Vordergrund der Analyse.
- Die *Produktionsstruktur* beeinflusst das Produktionsverhalten, beispielsweise über die Art der Segmentierung.
- Die *Produktstruktur* beeinflusst das Produktionsverhalten, beispielsweise über die Variantenentstehung.
- *Lieferanten* beeinflussen das Produktionsverhalten, beispielsweise über ihre logistische Leistung. Die Analyse des Lieferverhaltens steht nicht im Fokus der Arbeit.
- *Kunden* beeinflussen das Produktionsverhalten vor allem über die geforderten Lieferzeiten und -mengen. Die Untersuchung des Kundenverhaltens erfolgt in der Arbeit nur knapp.



Die Techniken der Modellierung, der quantitativen Analyse und der Visualisierung werden verwendet, um die wertstromorientierte Variantenfertigung systematisch abzubilden. Die Systemtheorie, insbesondere die Theorie der komplexen adaptiven Systeme, bildet das Fundament des Vorgehens.



## 3 Grundmodell der wertstromorientierten Variantenfertigung

Ziel des Kapitels ist es, anhand bestehender Grundlagen ein erweitertes Grundmodell der wertstromorientierten Variantenfertigung aufzubauen. Erstens wird das Grundmodell verwendet, um bestehende Ansätze einzuordnen. Zweitens baut das zu entwickelnde Vorgehen auf dem Grundmodell auf.

Zunächst beschreibt der folgende Abschnitt das Grundmodell der wertstromorientierten Fertigung (inklusive Teilefertigung und Montage) und zeigt dessen Einschränkungen bei der datenbasierten Analyse variantenreicher Produkt-Produktionssysteme auf. Um diese Einschränkungen aufzulösen, erweitert der zweite Abschnitt das Grundmodell, insbesondere um Elemente zur Beschreibung variantenreicher Produktstrukturen. Der dritte Abschnitt beschreibt relevante logistische Kennzahlen. Der letzte Abschnitt leitet aus dem erweiterten Grundmodell den weiterhin bestehenden Handlungsbedarf ab. Die Beschreibung des Grundmodells folgt dem Ordnungsrahmen in den Aspekten Struktur und Verhalten.

### 3.1 Grundlagen der datenbasierten Wertstromanalyse

Ziel der Arbeit ist es, eine wertstromorientierte Produktion mit Hilfe bestehender Produktionsdaten zu analysieren und daraus Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Daher stellt der folgende Abschnitt zunächst das Grundmodell der Wertstromanalyse vor. Zusammenfassend zeigt der zweite Abschnitt die Grenzen der Wertstromanalyse bei datenbasierten Analysen auf. Theoretische Grundlage ist die Wertstromanalyse nach Erlach (2020), welche auf den Vorarbeiten von Rother et al. (2009) basiert.

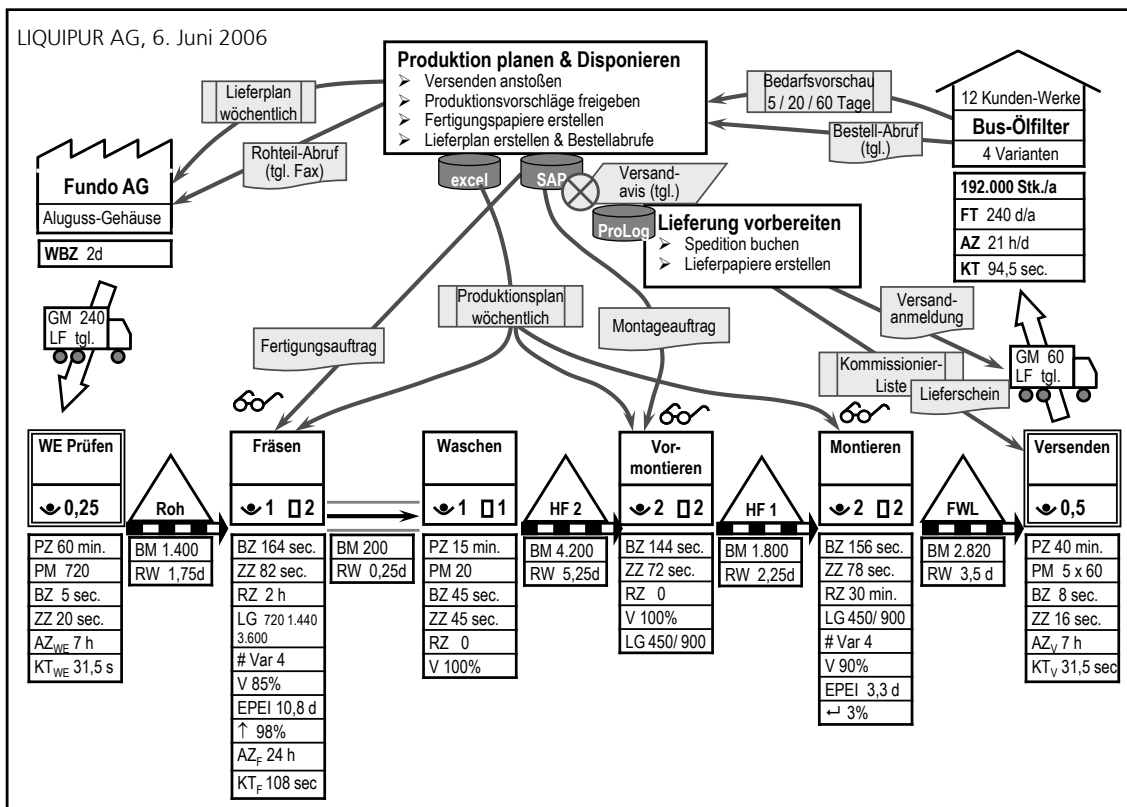
### 3.1.1 Grundmodell der Wertstromanalyse

Ziel der Wertstromanalyse ist es, die in einer Produktion vorherrschenden Gesamtzusammenhänge übersichtlich darzustellen und mit aussagekräftigen Kennzahlen die wesentlichen Eigenschaften zu beschreiben. Die Wertstromanalyse gliedert sich in vier Schritte: Produktfamilienbildung, Ermittlung des Kundenbedarfs, Abbildung der Produktion und Ausweisen der Potenziale. (Erlach 2020, S. 36)

Die Produktfamilienbildung fasst aus Produktionssicht ähnliche Produkte zusammen. Die für einen Repräsentanten ermittelten Werte sollten möglichst für alle in der Familie enthaltenen Produkte gültig sein. (Erlach 2020, S. 45)

Zentrales Ergebnis bei der Ermittlung des Kundenbedarfs ist der Kundentakt. Diese Leistungskennzahl beschreibt die mittlere Frequenz, in der produziert werden muss, um den mittleren Kundenbedarf zu decken. Über die Analyse der Kundenbedarfsschwankungen lässt sich die notwendige Kapazitätsflexibilität oder die Schwankung der Bestandshöhe abschätzen. (Erlach 2020, S. 51–54)

Die in Bild 3.1 exemplarisch dargestellte Wertstromaufnahme der Liquipur AG ist ein zentrales Ergebnis der Wertstromanalyse. Die vor Ort aufgenommene Darstellung zeigt die zur Produktion notwendigen Produktionsprozesse mit den zentralen Kennwerten und die logistischen Verknüpfungen inklusive der Bestände. Oberhalb der Prozessschritte sind die notwendigen Geschäftsprozesse und die dazugehörigen Informationsflüsse dargestellt. Als Systemgrenzen werden Kunden mit ihren Bedarfen sowie Lieferanten eingezeichnet. (Erlach 2020, S. 32–33, 56)



**Bild 3.1** Exemplarische Wertstromdarstellung (Erlach 2020, S. 101)

Die Wertstromdarstellung ist eine Überblicksdarstellung und verwendet zur Abbildung der Produktion zahlreiche domänenspezifische Symbole: Produktionsprozesse werden nach Zugehörigkeit in interne und externe Produktionsprozesse untergliedert (Erlach 2020, S. 57). Lager- und Pufferbestände sowie Materialflüsse werden anhand ihrer Bevorratungsstrategie (z.B. Kanban, Push-Lager) unterschieden (Erlach 2020, S. 57, 407). Ein Datenkasten führt die zentralen Kennwerte eines Elements auf (Erlach 2020, S. 406). Die Darstellung der Informationsflüsse und der Geschäftsprozesse (angelehnt an DIN 66001) vervollständigt die umfassende Darstellung der Produktion. (Erlach 2020, S. 89–102)

Aufbauend auf der Wertstromdarstellung weist der letzte Analyseschritt Verbesserungspotenziale aus. Über das Verhältnis von Durchlauf- und Bearbeitungszeiten lässt sich die Trägheit der Produktion ermitteln. Der im Taktabstimmungsdiagramm erkennbare relative Auslastungsgrad zeigt die kapazitative Abstimmung der einzelnen Prozesse zueinander. (Erlach 2020, S. 102)

Stärke der Wertstromanalyse ist insbesondere die prägnante Darstellung der aktuellen Ist-Situation. Die Konzentration auf die Mittelwerte zentraler Kennwerte erlaubt es, systematische Abweichungen zu erkennen. Durch die vor Ort durchgeführten Messungen und Zählungen wird zudem ein Eindruck von den tatsächlich vorherrschenden Bedingungen gewonnen. Aufwändige Datenbankabfragen und deren Auswertung entfallen. (Erlach 2020, S. 34) Die Wertstromanalyse bildet daher die Grundlage für das Vorgehen dieser Arbeit.

### 3.1.2 Grenzen der Wertstromanalyse in der Variantenfertigung

Gängige IT-Systeme bilden die variantenreiche Produktion mit Hilfe von Klassen objektorientiert ab. Je eindeutiger sich die Objekte des IT-Systems mit Hilfe der Symbolik der Analysemethode darstellen lassen, desto leichter fällt die Kombination von Datenanalyse und der Aufnahme vor Ort. In diesem Anwendungsfall stößt die Wertstromanalyse sowohl bei der Analyse der Strukturen als auch des Verhaltens an Grenzen.

Die *Strukturanalyse* stößt insbesondere bei der Abbildung umfangreicher Produkt-Produktionssysteme an Grenzen. Die in der Wertstromanalyse verwendete Bedeutung von Puffern und Arbeitssystemen unterscheidet sich von der in IT-Systemen gängigen Bedeutung.

**Übersichtlichkeit:** Ursprung der Wertstromanalyse ist die getaktete Serienfertigung mit geringer Variantenanzahl und einer überschaubaren Anzahl an Prozessschritten. Bei der Abbildung umfangreicher mehrstufiger Produkte mit hoher Variantenanzahl verliert die Wertstromdarstellung ihre Übersichtlichkeit. Gesamtwertströme sind nur noch als Plot und nicht mehr im handlichen A3-Format darstellbar. (vgl. Forno et al. 2014, S. 784; Luz et al. 2021, S. 121)

**Produktstruktur:** Bei der Planung und Steuerung mehrstufiger Produkte über Aufträge entstehen Auftragsnetze. Insbesondere bei kurzen Durchlaufzeiten mit geringen Sicherheitspuffern verschieben bereits geringe Verzögerungen den kritischen Pfad des Netzes. (Wiendahl 2011, S. 15–16) Die Abbildung und Analyse solcher Auftragsnetze gewinnt daher an Bedeutung. Die Wertstrommethode bietet keine systematische Unterstützung bei der Abbildung und Analyse von Auftragsnetzen. (vgl. Tomašević et al. 2021, S. 1013; Forno et al. 2014, S. 782–784)

**Bestände:** Die Wertstromaufnahme unterscheidet Bestände in Puffer- und Lagerbestände einerseits anhand der üblichen Liegezeit, andererseits anhand der Dispositionsstrategie (Erlach 2020, S. 81, 87–88; Knössl 2013, S. 137; Pfohl 2018, S. 99). Diese Unterscheidung der Bestände ist nicht trennscharf und eindeutig genug, um eine automatische Analyse anhand bestehender Auftragsdaten durchführen zu können. (vgl. Tomašević et al. 2021, S. 1008)

**Arbeitssysteme:** Die Wertstromaufnahme bildet die einzelnen Arbeitsgänge ab und notiert die zur Durchführung der Arbeitsgänge notwendige Anzahl an Ressourcen (Mitarbeiter und Maschinen) (Erlach 2020, S. 56–57). In der PPS ist jedoch ein umgekehrtes Vorgehen üblich: Das System bildet zunächst Arbeitssysteme ab. Auf diesen werden die einzelnen Arbeitsvorgänge und dadurch die durchzuführenden Produktionsprozesse geplant (Wiendahl 2011, S. 82–83). Für eine datenbasierte Analyse ist somit die Modellierung der Wertstrommethode anzupassen.

Die Grenzen der Wertstrommethode bei der *Verhaltensanalyse* zeigen sich bei der Nutzung und Visualisierung bestehender Datenquellen. Insbesondere die Auswertung von Termininformationen stellt die Methode vor Herausforderungen.

**Datennutzung:** Die Nutzung von IT-Systemen erzeugt eine Vielzahl an Daten. Diese sind in der vor Ort Wertstromaufnahme von untergeordneter Relevanz, beinhalten jedoch für die Produktion oft relevante Informationen. (z.B. Verlauf der Bestandshöhen oder der erbrachten Leistung im Zeitverlauf). (vgl. Lugert et al. 2018, S. 899; Lugert 2019, S. 114; Roessler et al. 2015, S. 394)

**Datenvisualisierung:** Die Wertstromanalyse stellt lediglich die Mittelwerte der relevanten Kennzahlen dar. Bei einer geglätteten Produktion ist dies legitim. Je turbulenter das Umfeld, desto wichtiger werden jedoch neben dem Mittelwert einer Kennzahl auch die dazugehörige Abweichungen (v.a. Streuung, Schwankung) (Wiendahl 2011, S. 207). (vgl. Forno et al. 2014, S. 782–783; Lugert et al. 2018, S. 899)

Je nach Konfiguration der Steuerungslogik des Planungssystems tritt eines von zwei logistischen Koordinationsattributen in den Vordergrund (Wiendahl 2011, S. 128):

- In der *Serienfertigung* erfolgt die Synchronisation der Produktion in der Regel über definierte Mengen bzw. Bestandshöhen. Gängige Verfahren der Mengensteuerung sind beispielsweise Kanban oder die in der Automobilindustrie gängigen Fortschrittszahlen (Erlach 2020, S. 192–225; Lödding 2016, S. 285–311).
- In der *Einzel- und Variantenfertigung* erfolgt die Synchronisation aufgrund der hohen Variantenvielfalt in der Regel über Termine. Gängige Verfahren der Terminsteuerung sind die Auftragsfreigabe nach Termin oder die Rückstandsregelung (Lödding 2016, S. 357–372, 551–572).

**Auftragsanalyse:** Die für Terminsteuerung elementaren (Herstell-)Aufträge mit den zugehörigen Terminen spielen in der klassischen Wertstromanalyse nur eine untergeordnete Rolle. Für die Ermittlung der aus Kundensicht relevanten Termintreue ist eine Analyse der Auftragsdaten jedoch unabdingbar. Beispielsweise kann ein einzelnes Fehlteil zu hohen, aber nicht bearbeitbaren Beständen führen. (vgl. Lugert et al. 2018, S. 899)

**Fazit:** Die Wertstrommethode ist aufgrund ihrer Historie und ihres Fokus auf das Geschehen vor Ort eine per se analoge Methode der Serienfertigung. Die in IT-Systemen übliche Strukturierung der Objekte ist daher für sie von untergeordneter Bedeutung. Eine datenbasierte Methode, deren Datenquellen genau diese IT-Systeme sind, sollte jedoch die üblichen Strukturen innerhalb der IT-Systeme berücksichtigen. Aufgrund der in der Variantenfertigung üblichen Terminsteuerung sollte die Methode zudem eine systematische Analyse der Auftragsdaten unterstützen.

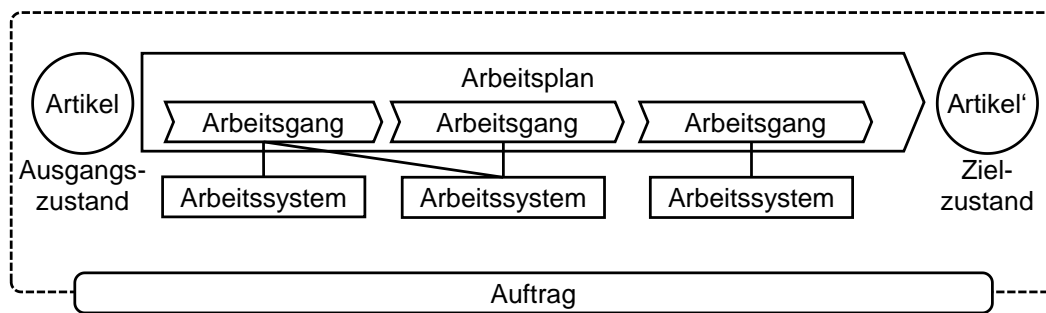
## 3.2 Erweiterte Strukturbeschreibung

Die Erweiterung der Wertstrommethode aus Struktursicht basiert wesentlich auf den Arbeiten von Wiendahl (2011) und Schönsleben (2020). Schwerpunkt dieser Arbeiten bilden die PPS und die Abbildung der Produktion in IT-Systemen. Sie sind geeignet, die im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigten Grenzen der Wertstromanalyse systematisch zu erweitern.

Die Beschreibung und Erweiterung des wertstromorientierten Grundmodells geht von den Grund- sowie Dispositionsobjekten nach Wiendahl (2011, S. 79, 108) aus. Bild 3.2 zeigt



die in der Arbeit verwendeten zentralen Klassen und ihre zentralen Verbindungen: Ein aus einzelnen Arbeitsvorgängen bestehender Arbeitsplan beschreibt die technischen Schritte, die mit Hilfe von Arbeitssystemen einen Artikel von einem Ausgangs- in einen Zielzustand umwandeln. Die logistische Koordination der Umwandlung erfolgt über Aufträge. (Wiendahl 2011, S. 79)



**Bild 3.2** Zentrale Klassen des erweiterten Grundmodells (nach Wiendahl 2011, S. 80)

Die folgenden Abschnitte beschreiben und detaillieren die drei zentralen Klassen Artikel, Auftrag und Arbeitssystem. Arbeitsplan und Arbeitsgang werden innerhalb der Beschreibung des Auftrags knapp dargestellt. Auf eine detaillierte Darstellung der von Wiendahl (2011) verwendeten generischen Klasse Prozess wird verzichtet, da diese für den weiteren Verlauf der Arbeit von untergeordneter Relevanz ist. Insbesondere die Unterscheidung zwischen Lägern (Artikel) und Puffern (Auftrag) sowie die differenzierte Betrachtung des Rückstands (Arbeitssystem) erweitert und präzisiert die bestehenden Grundmodelle.

Das in der Arbeit verwendete Grundmodell ist weitgehend konsistent zum Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen mit den zentralen Klassen Produkt, Prozess und Ressource (Feldmann et al. 2008; Steinwasser 1996). Die im Beschreibungsmodell detaillierten technischen Prozessparameter sind für die Disposition von untergeordneter Bedeutung. Die Abbildung des Prozessablaufs erfolgt in der vorliegenden Arbeit schwerpunktmäßig grafisch.

### 3.2.1 Artikel

Als Artikel wird ein physisches, in sich geschlossenes Gut in einem definierten Zustand bezeichnet. Jeder Artikel ist über die Artikelnummer eindeutig identifizierbar. (Wiendahl 2011, S. 80)

Angelehnt an die Prozesskategorien des SCOR-Modells werden in der Arbeit die folgenden Spezialisierungen des Artikels unterschieden: Aus Liefersicht wird jeder Artikel als *Produkt* bezeichnet, der zum Verkauf an Kunden vorgesehen ist. Eine *Komponente* ist ein Artikel, der als *Produktionskomponente* selbst produziert oder als *Beschaffungskomponente* eingekauft wird. Alternative Bezeichnungen sind Eigen- bzw. Kaufteil. (Wiendahl 2011, S. 80, vgl. Krause et al. 2018, S. 83; Schönsleben 2020, S. 22)

Eine Komponente kann zeitgleich als auch im Zeitverlauf veränderlich sowohl fremdbeschafft als auch selbst produziert werden. Ein einzelner Artikel kann sowohl Komponente für ein Produkt als auch Produkt selbst sein. Jeder Artikel kann aus mehreren Artikeln bestehen (Kardinalität  $\geq 0$ ). Eine *Stückliste* beschreibt die physische und hierarchische Struktur mehrstufiger Artikel. Die einzelnen Ebenen der Struktur heißen *Stücklistenstufen*. (Wiendahl 2011, S. 81; Schuh et al. 2012a, S. 141, vgl. Krause et al. 2018, S. 79; DIN EN ISO 10209, S. 63)

Logistisch relevante Merkmale eines Artikels sind insbesondere dessen Bestand, die gewählte Dispositionsstrategie sowie der Servicegrad. Die zu einem Zeitpunkt vorhandene Menge eines Artikels (in einem über die Artikelnummer definierten Zustand) wird als *Lagerbestand* bezeichnet, der dazugehörige Ort als *Lager*. (Wiendahl 2011, S. 80–81, Schönsleben 2020, S. 17–18)

Grundlage zahlreicher logistischer Gestaltungsüberlegungen ist die (artikelbezogene) Wahl der Dispositionsstrategie. Sie legt die Bedarfsauslösung und somit die Erzeugung von Produktions- und Beschaffungsaufträgen fest. Die Unterteilung der Dispositionsstrategien erfolgt anhand der Reihenfolge von Ausliefern und (wieder) Herstellen in zwei Grundformen sowie eine Mischform (Wiendahl 2011, S. 119, 128, 281–283):

- **Bedarfssteuerung:** In der Auftragsfertigung erfolgt die Disposition bedarfsbezogen, d.h. einem Produktionsauftrag ist eindeutig ein Kundenauftrag zugeordnet. Die Produktion wird in der Regel über Termine synchronisiert.
- **Verbrauchssteuerung:** In der Lagerfertigung erfolgt die Disposition verbrauchsbezogen, d.h. Kunden- und Produktionsauftrag sind zeitlich und mengenmäßig entkoppelt. Die Produktion wird in der Regel über Mengen synchronisiert.

- **Plansteuerung:** Eine wichtige Mischform ist die erwartungsorientierte Disposition, bei der die Auftragsauslösung basierend auf prognostizierten Bedarfen erfolgt. Die Produktion wird entweder über Termine (z.B. prognostizierte Abrufe kundenindividueller Teile) oder Mengen (z.B. prognostizierte Mengen) synchronisiert.

Insbesondere in der Lagerfertigung ist der Servicegrad (eines Lagers) von hoher logistischer Bedeutung. Er ist als der „Anteil der sofort befriedigten Anfragen an allen Anfragen in einem Bezugszeitraum definiert“ (Lödding 2016, S. 30). Der Servicegrad aus externer Kundensicht lässt sich nicht immer exakt ermitteln. Häufig werden Anfragen, die aufgrund fehlender Lagerbestände nicht zu Aufträgen führen, nicht systematisch erfasst (Lödding 2016, S. 31). Aus interner Dispositionssicht ist die Ermittlung des Terminverzuges aus fehlendem Lagerbestand in der Regel hilfreicher. Je länger ein Artikel nicht verfügbar ist, desto kritischer in der Regel für die Termineinhaltung des Kundenauftrags. Als Fehlbestand werden alle überfälligen aber noch nicht gedeckten Bedarfe bezeichnet (Wiendahl 2011, S. 158).

### 3.2.2 Auftrag

Ein *Auftrag* koordiniert den Prozess zur Beschaffung, Produktion oder Lieferung von Artikeln hinsichtlich der Koordinationsattribute Art, Menge, Termin und Ort. Über die Verbindungen zu Artikeln und Arbeitssystemen plant und steuert der Auftrag die Artikel- und Kapazitätsbedarfe. (Wiendahl 2011, S. 85–86; Schönsleben 2020, S. 24)

Ein Auftrag ist das Ergebnis einer Übereinkunft zwischen einem Lieferanten, der den Auftrag zu erfüllen und einem Kunden, der den Auftrag abzunehmen hat. Je nach Stellung der Parteien zum betrachteten System sind zwei Grundformen und eine Mischform unterscheidbar (Wiendahl 2011, S. 67, 87–106; Schönsleben 2020, S. 22–25):

- **Interne Dispositionssicht:** Die Aufträge der internen Dispositionssicht werden als *Herstellaufträge* bezeichnet. Sie lassen sich weiter unterscheiden: Über einen *Beschaffungsauftrag* (Fremdbezugsauftrag) bestellt ein interner Kunde bei einem externen Lieferanten. Über einen *Produktionsauftrag* (Eigenfertigungsauftrag) beauftragt ein interner Kunde einen internen Lieferanten.

- **Externe Kundensicht:** Über einen *Kundenauftrag* (Lieferauftrag) bestellt ein externer Kunde bei einem internen Lieferanten.
- **Intercompany:** Über einen *Intercompany-Auftrag* bestellt ein interner Kunde bei einem in der Regel nicht vollständig selbständigen Lieferanten.

Aufträge enthalten aus objektorientierter Sicht eine Kopie eines *Arbeitsplans* mit einzelnen Arbeitsgängen. Die im Arbeitsplan festgelegten Vorgabewerte für diese Attribute sind im Rahmen der Einplanung anpassbar. Ein Arbeitsplan umfasst die Liste der Arbeitsgänge zur Produktion eines Artikels sowie weitere Attribute. Jede Produktionskomponente muss mindestens einen gültigen Arbeitsplan besitzen, wobei der üblicherweise verwendete Arbeitsplan als *Standardarbeitsplan* und alle weiteren Arbeitspläne als *Alternativarbeitspläne* bezeichnet werden. (Schönsleben 2020, S. 30, 703)

Der *Arbeitsgang* (Arbeitsvorgang) eines Herstellauftrags ist die Instanz eines Prozessschritts inklusive der Vorgabewerte. Er fixiert die vier o.g. Koordinationsattribute. Dazu zählen beispielsweise die benötigten Mengen an Anfangsartikeln oder die Zeiten zur Durchführung des Arbeitsgangs. (Schönsleben 2020, Kap. 13; Wiendahl 2011, S. 122–123)

Logistisch relevante Merkmale eines Auftrags sind insbesondere Start- und Endtermin sowie die sich daraus ergebende Durchlaufzeit. Die *Durchlaufzeit* bezeichnet die Zeitdauer zwischen Beginn und Ende eines Prozesses und kann für Arbeitsgänge und Aufträge ermittelt werden. Bei der Wertstromanalyse wird die mittlere Durchlaufzeit über die Summe der Bestandsreichweiten ermittelt. (Erlach 2020, S. 103–104; Wiendahl 2011, S. 111) Sollen jedoch bestehende Auftragsdaten zur Analyse der Durchlaufzeit verwendet werden, ist eine Durchlaufzeitermittlung über die Arbeitsgang- und Auftragsdaten zielführender.

Die *Durchlaufzeit des Arbeitsgangs* ist die Zeit zwischen Start und Ende eines Arbeitsgangs. Sie ist in *Übergangszeit des Arbeitsgangs* (mit den Bestandteilen Liegen nach Bearbeiten, Transportieren, Liegen vor Bearbeiten) und *Durchführungszeit des Arbeitsgangs* (mit den Bestandteilen Rüsten und Bearbeiten) unterteilt. Die Abbildung der Zugangs- und Abgangereignisse eines Arbeitsgangs heißt Durchlaufelement. (Wiendahl 2011, S. 110–111; Schönsleben 2020, S. 29–30; Nyhuis et al. 2012, S. 19–20)

Die *Durchlaufzeit (eines Auftrages)* ist in der Arbeit als Dauer zwischen Freigabe des Auftrags und dem Eingang im Lager definiert. Hauptbestandteil der Durchlaufzeit sind üblicherweise die Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsgänge. Zu den weiteren Zeitanteilen der Durchlaufzeit zählt insbesondere die Sicherheitszeit. Sicherheitszeiten werden häufig vor Montageaufträgen eingesetzt, um einzelne Aufträge bewusst frühzeitig fertigzustellen und somit die Kompletierer zu beeinflussen. (Schönsleben 2020, S. 31; Wiendahl 2011, S. 111–112)

Die *Terminabweichung* beschreibt die zeitliche Abweichung zwischen einem geplanten Soll- und einem tatsächlichen Ist-Termin. Insbesondere bei konvergierenden Produktstrukturen mit vielen bedarfsorientiert disponierten Artikeln ist eine geringe Endterminabweichung der Aufträge von hoher Bedeutung. Die *Komplettierung* gilt als der Zeitpunkt, an dem alle zum Start des Auftrags benötigten Teile inklusive der Auftragsfreigabe vorliegen. Je nach Struktur der Kundenaufträge kann neben der Montage auch die Zusammenstellung und der gemeinsame Versand der einzelnen Kundenauftragspositionen hohe Anforderungen an die Komplettierung stellen. (Wiendahl 2011, S. 128; Schmidt 2018, S. 50–55; vgl. Schmidt 2011, S. 69; Wiendahl et al. 2015, S. 598)

### 3.2.3 Arbeitssystem

Eine *Ressource* ist ein Leistungserbringer und führt die Arbeitsgänge zur Herstellung von Artikeln aus. Ressourcen können in Personal und Betriebsmittel, letztere weiter in Maschinen und Fertigungshilfsmittel (z.B. Werkzeuge und NC-Programme) unterteilt werden. (vgl. Wiendahl 2011, S. 82–83)

In der PPS erfolgt die Zuordnung der Arbeitsgänge in der Regel nicht zu einzelnen Ressourcen, sondern zu Arbeitssystemen. Ein *Arbeitssystem* (Kapazitätseinheit, Kapazitätsplatz, work center) fasst mehrere Ressourcen zu einer sich autonom koordinierenden Einheit zusammen. Die Bildung eines solchen Subsystems ist in der Praxis üblich und vereinfacht die Planung und Steuerung auf übergeordneter Ebene. (Wiendahl 2011, S. 83; Schönsleben 2020, S. 32–33)

Arbeitssysteme können nach Zugehörigkeit unterschieden werden: *Interne Arbeitssysteme* führen *interne Arbeitsgänge* aus und liegen innerhalb des direkten Einflussbereichs

der Produktion. *Externe Arbeitssysteme* führen *externe Arbeitsgänge* aus und lassen sich nur mittelbar durch die Produktionsverantwortlichen beeinflussen. Die Fremdvergabe von Arbeitsgängen an externe Arbeitssysteme erfolgt entweder aus technologischen oder kapazitiven Gründen. Über interne Arbeitssysteme (White Box) liegen in der Regel deutlich mehr Informationen vor als über externe Arbeitssysteme (Gray Box bzw. Black Box). (Haberfellner et al. 2015, S. 36, 56; Wiendahl 2011, S. 197, 411)

Ein Arbeitssystem bearbeitet streng genommen nicht einzelne Aufträge, sondern die dem jeweiligen Arbeitssystem zugewiesenen Arbeitsgänge eines Auftrags. Sowohl die betriebliche Praxis als auch die Produktionsforschung spricht dennoch von zu bearbeitenden Aufträgen an einem Arbeitssystem (vgl. Lödding 2016). Bei Betrachtung einzelner Arbeitssysteme subsumiert der Begriff Auftrag in dieser Arbeit daher die jeweils relevanten Arbeitsgänge eines Auftrags.

Logistisch relevante Merkmale eines Arbeitssystems sind insbesondere dessen Auslastung sowie die Bestände an zu verrichtender Arbeit. Die *Kapazität* eines Arbeitssystems beschreibt sein Leistungsvermögen, d.h. sein Potenzial zur Leistungserzeugung. In einer Periode nicht abgerufene Kapazität lässt sich nachträglich nicht mehr abrufen. Die *Leistung* beschreibt die tatsächlich erbrachte Arbeit. Das Verhältnis zwischen Leistung und Kapazität heißt *Auslastung*. (Wiendahl 2011, 80–83; Schönsleben 2020, S. 33–34)

In der Wertstromanalyse ist die Darstellung der geforderten Leistung (Leistungsbedarf) in Form des Kundentakts und die Darstellung der verfügbaren Leistung eines Arbeitssystems (Leistungsangebot) in Form der Zykluszeit üblich. Durch die Notation in Form von Zeiteinheiten pro Mengeneinheit ist bei Arbeitssystemen mit kurzen Zykluszeiten durch einfaches Messen unmittelbar erkennbar, ob die mittlere Kundennachfrage gedeckt werden kann.

Insbesondere bei verzweigten Wertströmen oder unterschiedlichen Schichtsystemen innerhalb einer Produktion sind für die betroffenen Arbeitssysteme gesonderte Kundentakts zu bestimmen. (Erlach 2020, S. 48–49, 76–77) Streuen die Bearbeitungszeiten der einzelnen Varianten stark, lässt sich zudem nicht mehr von exemplarischen Messungen auf die Auslastung des Arbeitssystems schließen. In solchen Fällen verliert die Notation

der Auslastung anhand des Kundentakts ihre Übersichtlichkeit. Die Bewertung der Auslastung über den Vergleich von geleisteten Zeiteinheiten (Ist-Leistung) zu verfügbaren Zeiteinheiten (Leistungsangebot) pro Periode ist daher in verzweigten Systemen mit hoher Variantenzahl oft günstiger. (Wiendahl 2011, 80–83; Schönsleben 2020, S. 33–34; Vollmann et al. 2005, S. 357)

Zur Leistungserbringung benötigen Arbeitssysteme Bestände (Umlaufbestand oder work-in-progress) an zu verrichtender Arbeit (Schönsleben 2020, S. 17–18; Nyhuis et al. 2012, S. 37). Diese Arbeit bezeichnet diesen Bestand als *Pufferbestand*, den dazugehörige Ort als *Puffer*.

Die Abgrenzung zum Lagerbestand erfolgt anhand der Zuordnung des Bestands zu einem Produktions- oder Beschaffungsauftrag. Die zu einem Zeitpunkt eindeutig einem solchen Auftrag zugeordnete Menge an Artikeln entspricht dem Pufferbestand. Artikel im Pufferbestand befinden sich typischerweise in angearbeiteten Zwischenzuständen. Sie sind also nicht in einem eindeutigen Ausgangs- oder Endzustand, womit eine eindeutige Identifikation über eine Artikelnummer unmöglich ist. Die Menge an Artikeln, die eindeutig einem Lagerort zugeordnet ist, entspricht dem Lagerbestand. Hier ist die Zuordnung zum Zustand über die Artikel- und Stücklistenbeschreibung eindeutig. (vgl. Hopp et al. 2011, S. 230)

Aus Sicht eines Arbeitssystems lässt sich der Pufferbestand weiter untergliedern (vgl. Wiendahl 2011, S. 143–144; Lödding 2016, S. 409):

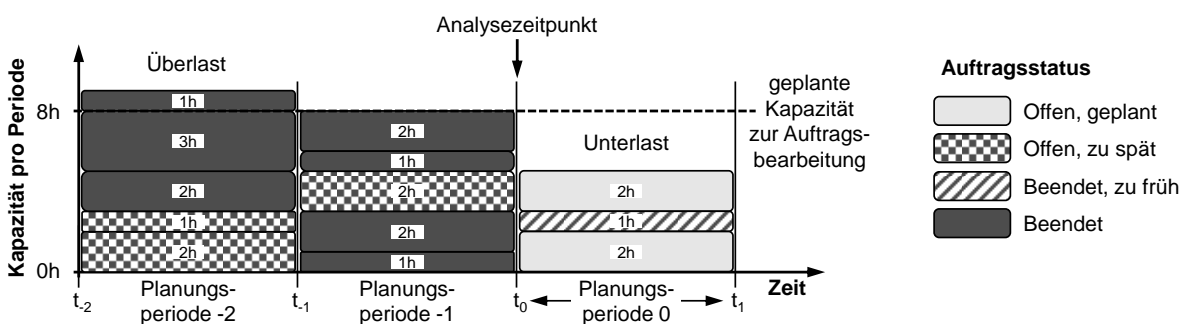
- Der *Indirektbestand* umfasst die Menge alle Aufträge, bei denen noch Arbeitsgänge vorhergehender Arbeitssysteme offen sind. Er ist am betrachteten Arbeitssystem noch nicht bearbeitbar.
- Der *Direktbestand* umfasst die Menge alle Aufträge bei denen der nächste auszuführende Arbeitsgang am aktuellen Arbeitssystem durchzuführen ist.

Diese Unterscheidung wird insbesondere für die Bewertung des Rückstands relevant. Der Direktbestand erfordert eine weitere Fallunterscheidung:

- Der *bearbeitbare Direktbestand* ist der Bestand, der unabhängig von der Kapazitätsverfügbarkeit des Arbeitssystems, bearbeitet werden könnte. Alle notwendigen Materialien und Fertigungshilfsmittel (z.B. Werkzeuge, Software) sind verfügbar und die Auftragsfreigabe wurde erteilt.
- Als *blockierter Direktbestand* (blockierter Arbeitssystembestand, gestörter Bestand) wird der aufgrund logistischer Ursachen nicht bearbeitbare Direktbestand bezeichnet. Ursachen für blockierten Direktbestand können beispielsweise fehlende Freigaben oder Komplettierer sein. (Lödding 2016, S. 66; Nyhuis et al. 2012, S. 235)
- Als *gesperrter Direktbestand* wird der aufgrund von technischen Ursachen nicht bearbeitbare Direktbestand bezeichnet. Ursachen für gesperrten Bestand sind Qualitätsmängeln. (Wiendahl et al. 2019, S. 24)

Aufträge bzw. Artikel, die das betrachtete Arbeitssystem bereits bearbeitet hat und die im System verbucht wurden, sind nicht mehr als Pufferbestand sichtbar. Sie sind dem folgenden Arbeitssystem als Pufferbestand bzw., nach Abschluss des letzten Arbeitsgangs, dem Lager als Lagerbestand zugeordnet.

Die vom Arbeitssystem zu bearbeitenden Aufträge lassen sich anhand ihrer Soll-Endtermine den jeweiligen Planungsperioden (z.B. Arbeitstagen) zuweisen. Bild 3.3 zeigt exemplarisch einen solchen Belegungsplan. Die Fläche eines Auftrags entspricht dem Arbeitsinhalt in Vorgabestunden. Die horizontale gestrichelte Linie zeigt die pro Periode zur Auftragsbearbeitung verfügbare Kapazität.



**Bild 3.3** Exemplarischer Belegungsplan eines Arbeitssystems (nach Ungern-Sternberg et al. 2020a, S. 583)



Das dargestellte Vorgehen zur Ermittlung der Kennzahlen basiert maßgeblich den auf Vorarbeiten von Ungern-Sternberg et al. (2020a). Anhand der Soll- und Ist-Endtermine wird jedem Auftrag zum Ende einer Planperiode, dem Analysezeitpunkt ( $t_0$ ), ein Status zugewiesen:

- **Offen, geplant:** Der Auftrag ist in der Zukunft zu bearbeiten. Er besitzt kein Ist-Endtermin, da er noch nicht beendet wurde. Sein Soll-Endtermin liegt in der Zukunft.
- **Offen, zu spät:** Der Auftrag ist offen, sollte jedoch beendet sein. Er besitzt kein Ist-Endtermin, da er noch nicht beendet wurde. Sein Soll-Endtermin liegt in der Vergangenheit.
- **Beendet, zu früh:** Der Auftrag ist beendet, sollte jedoch noch offen sein. Er besitzt einen Ist-Endtermin in der Vergangenheit. Sein Soll-Endtermin liegt in der Zukunft.
- **Beendet:** Der Auftrag ist beendet. Ob er, bezogen auf einen früheren Analysezeitpunkt zu früh oder zu spät beendet wurde, wird nicht weiter unterschieden. Er besitzt einen Ist-Endtermin in der Vergangenheit. Sein Soll-Endtermin liegt auch in der Vergangenheit.

Für jeden Analysezeitpunkt, lassen sich anhand des Auftragsstatus die nachfolgenden Kennzahlen aus Ressourcensicht ermitteln. Die Gewichtung die einzelnen Aufträge erfolgt anhand der Vorgabezeiten. (Ungern-Sternberg et al. 2020a; Nyhuis et al. 2012, S. 19; Wiendahl 2011, S. 120).

**Arbeitsrückstand:** Der Arbeitsrückstand beschreibt die überfälligen Aufträge des Arbeitssystems. Er entspricht der Summe aller offenen, zu späten Aufträge (Im Beispiel in Bild 3.3: 5 h).

**Vorleistung:** Die Vorleistung beschreibt die zu früh abgeschlossenen Aufträge. Sie entspricht der Summe aller zu früh beendeten Aufträge (Im Beispiel: 1 h).

**Leistungsrückstand:** Der Rückstand aus Leistungsabweichung, auch Gesamtrückstand genannt, ist die überfällige Leistung eines Arbeitssystems zu einem Zeitpunkt. Er entspricht der Differenz aus Arbeitsrückstand und Vorleistung. Ein negativer Gesamtrückstand wird teilweise auch als Vorlauf bezeichnet (Im Beispiel: 5 h – 1 h = 4 h Rückstand).

Über den Leistungsrückstand lässt sich die Frage beantworten, ob genug gearbeitet wurde.

**Rückstand aus Reihenfolgeabweichung:** Die Ermittlung des Rückstands aus Reihenfolgeabweichung basiert auf folgender Überlegung: Ein Arbeitssystem arbeitet *ohne* Leistungsabweichungen und hat exakt die zur Bearbeitung der Aufträge notwendige Kapazität. Bearbeitet ein solches Arbeitssystem einen noch nicht fälligen Auftrag, entsteht Vorleistung in Höhe seiner Vorgabestunden. Dadurch muss ein anderer, überfälliger Auftrag liegenbleiben, wodurch Arbeitsrückstand in gleicher Höhe entsteht. Der Rückstand aus Reihenfolgeabweichung entspricht in diesem Fall der Vorleistung bzw. dem dazu symmetrischen Arbeitsrückstand.

Erfährt ein solches Arbeitssystem Leistungsminderungen (z.B. durch Maschinenstörungen) bleiben weitere Aufträge liegen wodurch sich der Arbeitsrückstand um die Leistungsabweichungen erhöht. Die Vorleistung bleibt unverändert. Der Rückstand aus Reihenfolgeabweichung entspricht nach wie vor der Vorleistung.

Analog verhält es sich bei zu hoher Leistung (z.B. durch ungeplante Überstunden). Das Arbeitssystem bearbeitet zukünftige Aufträge wodurch sich die Vorleistung um die Überstunden erhöht. Bleibt der überfällige Auftrag unbearbeitet, entspricht der Rückstand aus Reihenfolgeabweichung dem Arbeitsrückstand.

In beiden Fällen entspricht der Rückstand aus Reihenfolgeabweichung dem Minimum aus Arbeitsrückstand und Vorleistung. Bild 3.3 verdeutlicht die Überlegung beispielhaft: Die zwei (gleich großen) Aufträge aus den Planungsperioden 0 und -2 wurden getauscht. Diese Reihenfolgeabweichung verändert den Leistungsrückstand nicht, verursacht aber eine Vorleistung von 1 h und ein Arbeitsrückstand von 1h. Das Arbeitssystem besitzt insgesamt 5 h Arbeitsrückstand und 1 h Vorleistung. Der Rückstand aus Reihenfolgeabweichung entspricht dem Minimum aus Arbeitsrückstand und Vorleistung und damit 1 h. Über den Rückstand aus Reihenfolgeabweichung lässt sich die Frage beantworten, ob an den richtigen Aufträgen gearbeitet wurde.

Mit dem vorgestellten Modell sind Reihenfolgevertauschungen innerhalb einer Planungsperiode nicht ermittelbar. Zudem können Reihenfolgeabweichungen innerhalb des Arbeitsrückstands nicht ermittelt werden.

Um die Reihenfolgeabweichungen genauer modellieren zu können, muss jedem Auftrag ein Rang zugewiesen werden (vgl. Lödding 2016, S. 85–90). Die Planung und Überwachung des Rangs ist in der Praxis wenig verbreitet. Aufgrund der ausreichenden Genauigkeit für diesen Anwendungsfall wird in dieser Arbeit der oben beschriebene vereinfachende Ansatz gewählt.

**Lastabweichung:** Die (geplante) Lastabweichung bezeichnet den Unterschied zwischen geplanter Auftragslast und der geplanten Kapazität zur Auftragsbearbeitung. Eine positive Lastabweichung heißt (geplante) Überlast. Sie kann insbesondere bei fehlender, der Produktionssteuerung zur Verfügung stehender Kapazitätsflexibilität zu Rückstand führen (Im Beispiel: Überlast von 1 h in Periode -2). Eine negative Lastabweichung heißt (geplante) Unterlast. Sie kann beabsichtigt sein, um beispielsweise bestehende Rückstände abzubauen (Im Beispiel: Unterlast von -3 h in Periode 0).

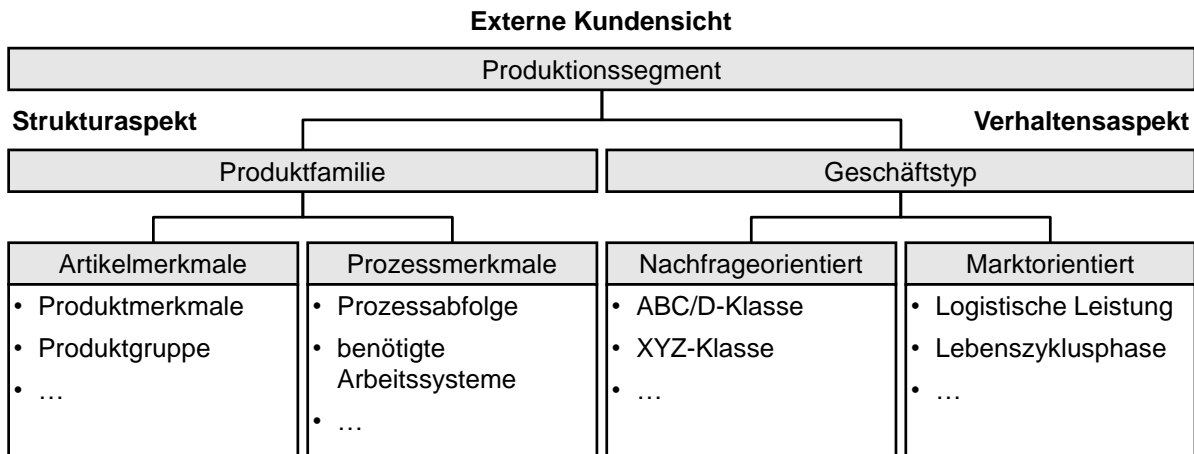
### 3.2.4 Produktionssegment und -modul

Um ein System mit einer hohen Vielfalt an Objekten analysieren zu können, gilt es diese Vielfalt geeignet zu gliedern (vgl. 2.4.2). Diese Arbeit gliedert die Produktion dafür in Segmente und Module. Dieses Vorgehen ist angelehnt an die Produktfamilienbildung der Wertstromanalyse. (Erlach 2020, S. 38)

#### **Produktionssegmente**

Ein *Produktionssegment* (kurz *Segment*) ist ein anhand der Produkte gebildeter Ausschnitt einer Produktion mit möglichst homogenen Eigenschaften. Da ein Produkt nur ausgeliefert werden kann, wenn all notwendigen Komponenten vorhanden sind, ist aus Kundensicht eine solche wertstromorientierte Segmentierung einer ressourcenorientierten Segmentierung vorzuziehen. Die Gliederung der Produktion in Segmente ist damit der externen Kundensicht zuordenbar. (Erlach 2020, S. 45, 127–128; Schönsleben 2020, S. 289; Spur et al. 1994, S. 220–225)

Bild 3.4 fasst die struktur- und verhaltensbezogenen Einflüsse auf die Segmentierung zusammen. Ein Produktionssegment wird sowohl anhand der zugrundeliegenden Produktfamilie als auch anhand des Geschäftstyps gebildet.



**Bild 3.4** Einflüsse auf die Produktionssegmentbildung

Eine *Produktfamilie* fasst Produkte mit ähnlichen strukturellen Artikel- und Prozessmerkmalen zusammen. Artikelmerkmale sind beispielsweise die verwendete Produktplattform, Rohmaterialien, Abmessungen, Gewichte sowie die Geometrie der Produkte. Prozesseigenschaften sind beispielsweise die Prozessfolge und die benötigten Arbeitssysteme. (Erlach 2020, S. 132–145; Krause et al. 2018, S. 68–69)

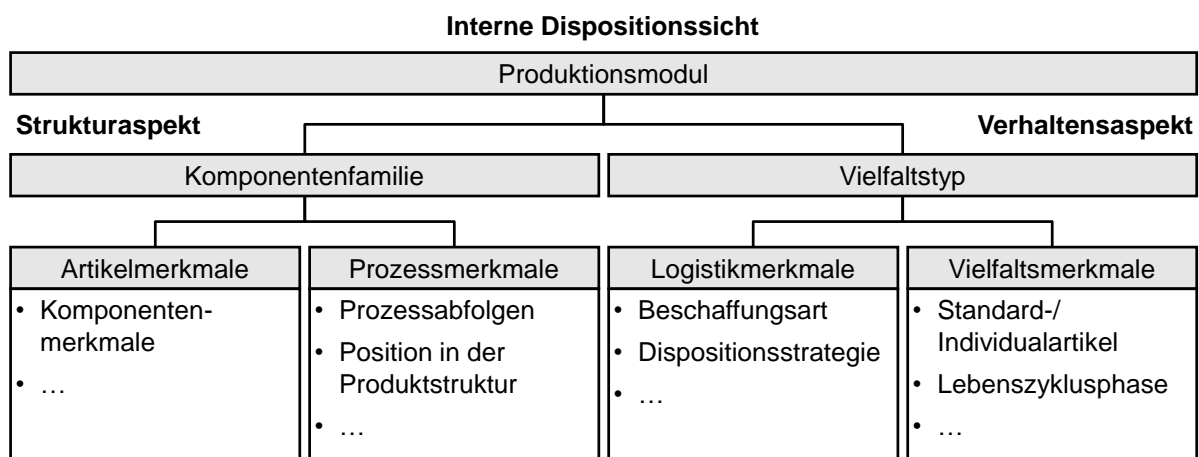
Ein *Geschäftstyp* fasst Produkte mit ähnlichen logistischen Eigenschaften zusammen und gliedert sich weiter in nachfrage- und marktorientierte Anforderungen auf: Nachfrageorientierte Eigenschaften sind beispielsweise anhand der Klassifizierung in ABC/D- bzw. XYZ-Produkte ableitbar. Marktorientierte Eigenschaften sind beispielsweise die vom Kunden geforderte Logistikleistung oder die Phase innerhalb des Produktlebenszyklus. (Nyhuis et al. 2012, S. 267–269)

### **Produktionsmodule**

Um die in der Variantenfertigung gewünschte Mehrfachverwendung von Komponenten in unterschiedlichen Produktfamilien abbilden zu können, wird zusätzlich eine Strukturierung der Produktion in Module durchgeführt. Das Vorgehen der Modulbildung ist einerseits angelehnt an den modularen Aufbau variantenreicher Produkte, andererseits an die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Segmentierungslogik der Wertstromanalyse.

Ein *Produktionsmodul* (kurz *Modul*) ist ein anhand der Komponenten gebildeter Ausschnitt einer Produktion mit möglichst homogenen Eigenschaften. (Krause et al. 2018, S. 81–83, 100–101, Schichtel 2002, S. 119)

Bild 3.5 fasst die struktur- und verhaltensbezogenen Einflüsse auf die Modularisierung zusammen. Ein Produktionsmodul wird anhand der zugrundeliegenden Komponentenfamilie sowie der in dieser Arbeit als Vielfaltstyp bezeichneten Eigenschaften gebildet. Aufgrund der Konzentration auf die interne Systemgliederung ist die Modulbildung der internen Dispositionssicht zuordenbar.



**Bild 3.5** Einflüsse auf die Produktionsmodulbildung

Eine *Komponentenfamilie* fasst Komponenten mit ähnlichen Artikel- und Prozessmerkmalen zusammen. Die Kriterien gelten dabei analog zu denen der Segmentierung. Zusätzliches Prozessmerkmal ist beispielsweise die relative Position der Komponentenfamilie zu den übergeordneten Produkten.

Ein *Vielfaltstyp* fasst Komponenten mit ähnlichen Merkmalen hinsichtlich Logistik und Vielfalt zusammen. Logistische Merkmale sind beispielsweise die Beschaffungsarten, die Dispositionsstrategie oder die Bedarfsklasse (ABC/D-Klasse). Zu den Vielfaltsmerkmalen zählen beispielsweise die Standardisierungsstrategie und die Phase im Lebenszyklus. (Nyhuis et al. 2012, S. 267–269; Kipp 2012, S. 64)

Ist ein Modul eindeutig einem Segment zuordenbar, kann dieses in Anlehnung an Erlach (2020, S. 81–82) auch als Wertstromzweig bzw. Teilwertstrom bezeichnet werden. Besteht ein Segment lediglich aus einem Modul, kann die Bezeichnung Segment synonym für Segment und Modul verwendet werden.

### 3.3 Erweiterte Verhaltensbeschreibung und -erklärung

Ziel des Abschnitts ist es, das Grundmodell der Wertstromanalyse hinsichtlich der Verhaltensbeschreibung und -erklärung zu erweitern. Dazu baut der Abschnitt auf der erweiterten Strukturbeschreibung auf (Abs. 3.2).

Die Erweiterung der Verhaltensbeschreibung folgt im Kern den produktionslogistischen Überlegungen nach Wiendahl (1997), Nyhuis (2008), Wiendahl (2011) und Lödding (2016). Die Ansätze stammen mehrheitlich aus der Einzel- und Variantenfertigung und sind daher geeignet, die Wertstromanalyse um die Besonderheiten dieser Fertigungstypen zu erweitern. Ausgehend vom Zielsystem der Logistik werden zunächst Kennzahlen zur Beschreibung des Systemverhaltens und die Kennzahlenermittlung dargestellt. Mit Hilfe des Trichtermodells erklärt der anschließende Abschnitt das Systemverhalten für die kleinste logistische Einheit, das Durchlaufelement. Darauf aufbauend werden mit Hilfe des Modells der Fertigungssteuerung die Wirkzusammenhänge für die Lieferkette beschrieben. Der letzte Abschnitt stellt Analysen zur Untersuchung und Priorisierung von Systementwicklungen vor.

#### 3.3.1 Kennzahlen logistischer Lieferketten

Kennzahlen gelten in der Regel für einen längeren Zeitraum und drücken die Zielerreichung innerhalb eines Systems aus. Die Kennzahlen zur Beschreibung der logistischen Zielerreichung lassen sich in vier Kategorien einteilen (Wiendahl 2011, S. 116–118, 64, 74; Erlach 2020, S. 23–26):

- Kennzahlen zur Beschreibung unzulässiger Abweichung eines tatsächlichen von einem geplanten Wert heißen *Zuverlässigkeitskennzahlen*. Qualitätskennzahlen zählen zu dieser Kategorie.

- Kennzahlen zur Beschreibung des Koordinationsattributs Zeit heißen *Durchlaufzeitkennzahlen*. Sie sind geeignet, die Geschwindigkeit einer Produktion zu beschreiben.
- Kennzahlen zur Beschreibung des Zustands des Koordinationsattributs Menge heißen *Bestandskennzahlen*. Die Unterscheidung der Bestände in der Produktion und im Lager ist üblich.
- Kennzahlen zur Beschreibung der Leistung und somit der Verbindung von Menge und Zeit heißen *Leistungskennzahlen*. Eine hohe Auslastung trägt zu geringen Logistikkosten und damit einer hohen Wirtschaftlichkeit bei.

Die Logistikleistung ist über die Zuverlässigkeits- und Durchlaufzeitkennzahlen beschreibbar. Eine hohe Logistikleistung ist durch zuverlässige und schnelle Lieferungen gekennzeichnet. Die dafür notwendigen Logistikkosten setzen sich aus den vorzuhaltenden Beständen und der bereitzustellenden Kapazität zur Leistungserbringung zusammen. Geringe Logistikkosten entstehen durch niedrige Bestände bei hoher Auslastung.

Logistikleistung	Logistikkosten
<p><b>Zuverlässigkeitskennzahlen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Artikel</i>: Fehlbestand / Fehlbestands-RW</li> <li>• <i>Auftrag</i>: Terminabweichung / Termintreue</li> <li>• <i>Arbeitssystem</i>: Rückstand / Rückstands-RW</li> </ul> <p><b>Durchlaufzeitkennzahlen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Artikel</i>: Lagerverweilzeit / -</li> <li>• <i>Auftrag</i>: Auftrags-DLZ / Flussgrad</li> <li>• <i>Arbeitssystem</i>: Arbeitssystem-DLZ / -</li> </ul>	<p><b>Bestandskennzahlen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Artikel</i>: Lagerbest. / Lagerbest.-RW</li> <li>• <i>Auftrag</i>: Losgröße / -</li> <li>• <i>Arbeitssystem</i>: Pufferbest. / Pufferbest.-RW</li> </ul> <p><b>Leistungskennzahlen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Artikel</i>: Durchsatz / -</li> <li>• <i>Auftrag</i>: - / -</li> <li>• <i>Arbeitssystem</i>: Leistung / Auslastung</li> </ul>

*Bezugsklasse*: absolute Kennzahl / relative Kennzahl    *Best.*: Bestand    *DLZ*: Durchlaufzeit    *RW*: Reichweite

**Bild 3.6**    Logistische Kennzahlen aus interner Dispositionssicht (in Anlehnung an VDI 4400 Blatt 2, S. 6; Wiendahl 2011, S. 108; Lödding 2016, S. 22)

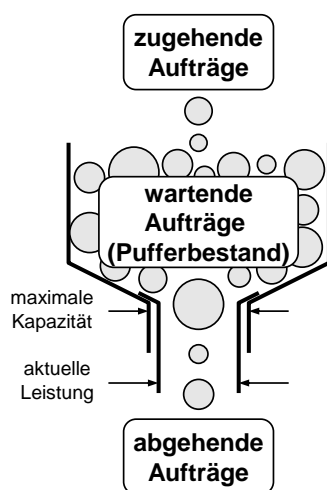
Bild 3.6 stellt bekannte logistische Kennzahlen für die vier Kategorien dar. Ausgehend von der aspektweisen Modellierung und angelehnt an die zentralen Klassen lassen sich die Kennzahlen der jeweiligen Bezugsklasse (Artikel, Auftrag, Arbeitssystem) zuordnen. Anhand des Bezugspunktes lassen sich absolute und relative Kennzahlen unterscheiden. (VDI

4400 Blatt 2, S. 5) In der Praxis sind nicht für alle Klassen Kennzahlen in allen Kategorien sowohl mit absolutem als auch mit relativem Bezug üblich. So wird in der Regel keine Leistungskennzahl aus Auftragsicht ermittelt. Für die detaillierte Definition und Beschreibung der einzelnen Kennzahlen sei auf Wiendahl (2011, S. 107–178) verwiesen.

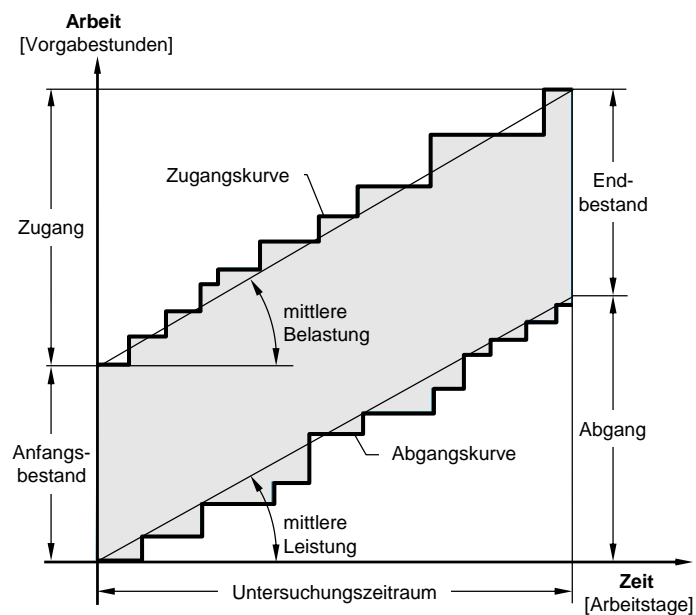
### 3.3.2 Trichtermodell und logistische Kennlinien

Mit Hilfe des Trichtermodells und des daraus abgeleiteten Durchlaufdiagramms können der Verlauf der logistischen Zielgrößen Pufferbestand, Durchlaufzeit und Auslastung an einem Arbeitssystem (aus Ressourcensicht) erklärt und visualisiert werden. (Wiendahl 2011, S. 110, vgl. Lödding 2016; Nyhuis 2008; Wiendahl 1997)

a) Trichtermodell



b) Durchlaufdiagramm



**Bild 3.7** Trichtermodell und Durchlaufdiagramm (nach Nyhuis et al. 2012, S. 25)

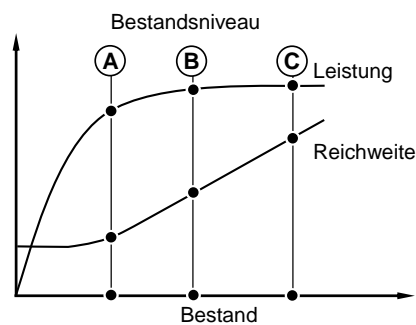
Basierend auf den Überlegungen von Bechte wird ein Arbeitssystem als Trichter modelliert (Bild 3.7a). Aufträge gehen dem Trichter zu, warten als Bestand auf Bearbeitung, werden bearbeitet und gehen nach erfolgter Bearbeitung ab. Die einzelnen Aufträge werden skaliert mit ihrer Auftragszeit als Kugeln dargestellt. Die Trichteröffnung zeigt die aktuelle sowie die maximal mögliche Leistung. (Wiendahl 2011, S. 110; Lödding 2016, S. 60; Bechte 1984, vgl. Vollmann et al. 2005, S. 355)



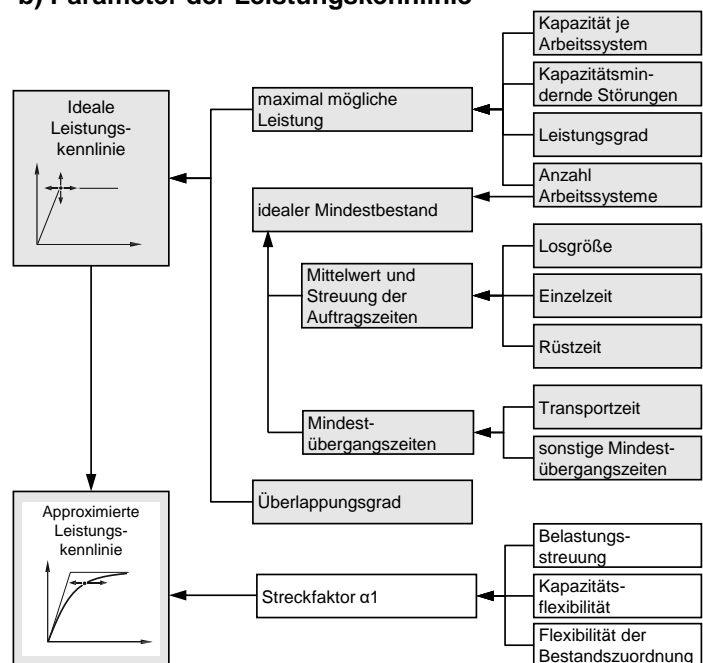
Das Durchlaufdiagramm stellt über die Vorgabezeiten den zeitlichen Verlauf der kumulierten Zu- und Abgänge an einem Arbeitssystem dar (Bild 3.7b). Der Pufferbestand entspricht dem vertikalen Abstand der Zugangs- und Abgangskurve. Die Pufferbestandsreichweite lässt sich aus dem horizontalen Abstand der Kurven ablesen. Bei einer Auftragsbearbeitung nach dem FIFO-Prinzip (First In – First Out) entspricht die Durchlaufzeit eines ankommenden Auftrags der Pufferbestandsreichweite. In diesem Fall kann die auf Little’s Law basierende und in der Wertstromanalyse übliche Berechnungsformel zur Bestimmung der Durchlaufzeit des Arbeitsgangs verwendet werden. (Wiendahl 2011, S. 110; Lödding 2016, S. 60; Erlach 2020, S. 103–104; Bechte 1984; Hopp et al. 2011, S. 239; Vollmann et al. 2005, S. 68–69; Knoepfel 1920, S. 358)

Zur Darstellung der Wirkzusammenhänge und zur geeigneten Konfiguration des Produktionssystems eignet sich die auf dem Trichtermodell aufbauende Kennlinientheorie mit den Produktions- und Lagerkennlinien. Für eine detaillierte Beschreibung der Kennlinientheorie sowie der Lagerkennlinie sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. (Nyhuis et al. 2012; Wiendahl 2011; Lödding 2016; Hopp et al. 2011, S. 238)

**a) Produktionskennlinie**



**b) Parameter der Leistungskennlinie**



Parameter mit  elementarer Bedeutung  empirischer Bedeutung

**Bild 3.8** Produktions- und Lagerkennlinien (nach Nyhuis et al. 2012, S. 37, 246)

„Produktionskennlinien stellen den Verlauf der logistischen Zielgrößen Leistung (bzw. Auslastung), Durchlaufzeit, relative Terminabweichung und relative Termintreue als Funktion des Bestandes dar. Im Gegensatz zum Durchlaufdiagramm ermöglichen sie so eine unmittelbare Aussage über die Höhe des angemessenen Bestandsniveaus.“ (Lödding 2016, S. 63). Abhängig vom Bestandsniveau des bearbeitbaren Direktbestands lassen sich drei typische Betriebszustände unterscheiden (Bild 3.8a, Nyhuis et al. 2012, S. 37):

- Bei geringem Bestandsniveau (A) kommt es aufgrund von Materialflussabbrissen zu Einbußen in der Leistung.
- Im Übergangsbereich (B) ist das Bestandsniveau so hoch, dass fehlender Bestand die Leistung nur noch unwesentlich beeinflusst.
- Bei hohem Bestandsniveau (C) führt zusätzlicher Bestand nur noch zu marginalen Leistungssteigerungen. Die Durchlaufzeit steigt jedoch proportional mit der Erhöhung des Bestands an.

Wertstromorientierte Produktionen positionieren sich in der Regel im Bereich zwischen geringem Bestandsniveau und dem Übergangsbereich. Ziel sind möglichst kurze Durchlaufzeiten. Störungen sollen sichtbar werden, um diese gezielt beheben zu können. Um solch kurze Durchlaufzeiten zu erreichen, setzt das Wertstromdesign Gestaltungsrichtlinien ein (Erlach 2020, S. 262).

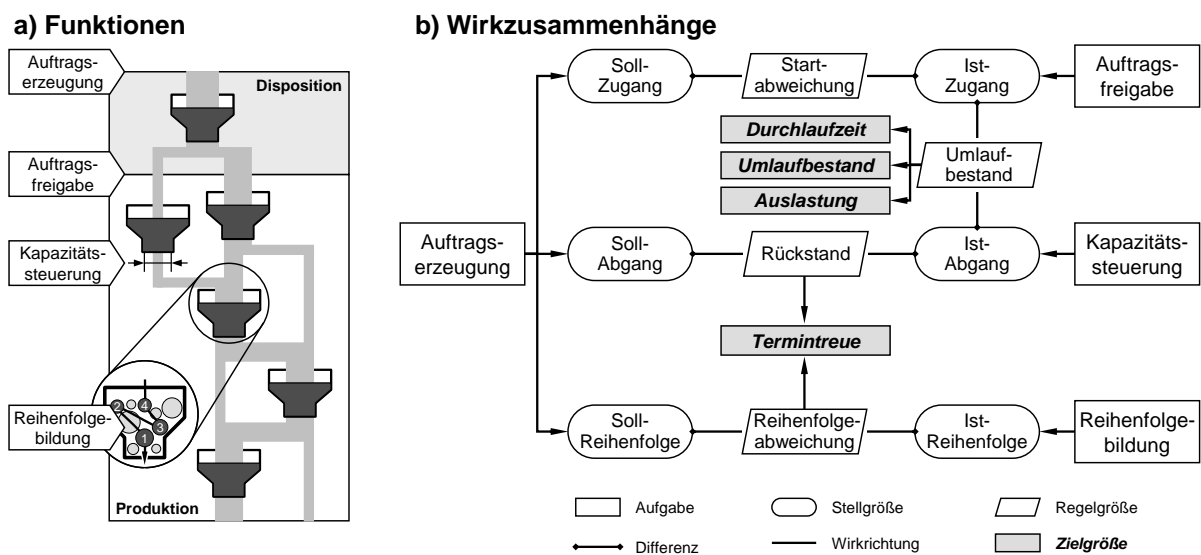
Der Verlauf der Leistungskennlinie ist abhängig von Parametern mit elementarer und empirischer Bedeutung (Bild 3.8b). Anhand der Parameter lassen sich insbesondere die Gestaltungsrichtlinien des Wertstromdesigns erklären, die auf eine Nivellierung der Freigabeeinheiten sowie eine Reduzierung der Rüstzeiten abzielen. Je kleiner die Freigabeeinheiten und die Streuung der Auftragszeiten, desto geringer der ideale Mindestbestand. (Nyhuis et al. 2012, S. 120–122; Erlach 2020, S. 262–263)

Hervorzuheben beim Wertstromdesign ist die gezielte Gestaltung der Systemstruktur, um das Systemverhalten zu beeinflussen. Da jedes Arbeitssystem einen Mindestbestand und Mindestübergangszeiten benötigt, erhöht jedes Arbeitssystem in einer Herstellkette die Durchlaufzeit eines Auftrags. Die angestrebte Prozessintegration reduziert diese Bestände und Durchlaufzeitanteile. (Erlach 2020, S. 262)

Neben den strukturellen Änderungen gibt das Wertstromdesign auch Gestaltungsempfehlungen für die Steuerung der Produktion. Der nächste Abschnitt behandelt diese detaillierter.

### 3.3.3 Wirkzusammenhänge der Fertigungssteuerung

Aufbauend auf dem zuvor beschriebenen Trichtermodell und der Kennlinientheorie lassen sich anhand des Wirkmodells der Fertigungssteuerung nach Lödding (2016) die relevanten Wirkzusammenhänge und Aufgaben im Rahmen der Fertigungssteuerung darstellen. Aufgrund der Reduktion auf grundlegende logistische Beziehungen eignet sich das Modell insbesondere zur übersichtlichen Erklärung der Zusammenhänge zwischen Aufgaben und Zielgrößen der Fertigungssteuerung. (Lödding 2016, S. 6–12; Wiendahl 2011, S. 237–240).



**Bild 3.9** Wirkmodell der Fertigungssteuerung (aus Wiendahl 2011, S. 238, nach Lödding 2016, S. 8)

Bild 3.9 stellt diese Zusammenhänge anhand des von Lödding (2016) entwickelten und Wiendahl (2011) erweiterten Wirkmodells der Fertigungssteuerung dar: Die Fertigungssteuerung legt die Stellgrößen des Systems fest. Die Abweichungen zweier Stellgrößen ergeben die Regelgrößen des Modells. Diese wiederum beeinflussen die logistischen Ziel-

größen. (Lödding 2016, S. 8) Zur detaillierten und vollständigen Beschreibung der Wirkungen auf eine einzelne Zielgröße eignen sich die bereits erwähnten Ursache-Wirkungs-Diagramme (Abs. 2.4.3; Haberfellner et al. 2015, S. 200).

Anhand der zulässigen Durchlaufzeitstreuung lassen sich zwei logistische Leitbilder unterscheiden (Wiendahl 2011, S. 284–285):

- **Gleichmäßiger Auftragsstrom:** Ziel ist es, einen gleichmäßigen Auftragsfluss mit stabilen Durchlaufzeiten zu erreichen. Die Durchlaufzeitermittlung kann über Mittelwerte erfolgen.
- **Turbulenter Gebirgsbach:** Ziel ist es, die individuellen Anforderungen an die Durchlaufzeiten der Aufträge über individuelle Planung und Steuerung zu erfüllen. Die Durchlaufzeit muss für jeden Auftrag einzeln ermittelt werden.

Wertstromorientierte Produktionen folgen dem Idealbild der Pipeline und damit dem Leitbild des gleichmäßigen Auftragsstroms: Aufträge durchlaufen, möglichst schnell, in fester FIFO-Reihenfolge, aufeinander abgestimmte Prozess- und Pufferschritte. Ziel sind möglichst kurze Übergangs- und Durchlaufzeiten. (Erlach 2020, S. 102–104)

Bei der logistischen Ausrichtung auf einen gleichmäßigen Auftragsstrom treten die Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung gegenüber der Auftragserzeugung und der Reihenfolgebildung in den Vordergrund. (Erlach 2020, S. 280; Wiendahl 2011, S. 284) Die Aufgaben der Fertigungssteuerung beeinflussen die logistische Zielerreichung maßgeblich. Sie werden daher nachfolgend ausführlicher dargestellt.

### ***Auftragserzeugung***

Die *Auftragserzeugung* inklusive der Berechnung und Festlegung der relevanten Termine ist eines der zentrale Elemente der Produktionsplanung (Lödding 2016, S. 165; Schuh et al. 2012c, Abs. 2.2.3; Vollmann et al. 2005, S. 222–259). Diese liegt nicht im Betrachtungsbereich der Arbeit. Im Folgenden wird daher von vollständig spezifizierten Aufträgen (Art, Menge, Soll-Termin, Ort) ausgegangen. Zudem wird davon ausgegangen, dass einmal fixierte Aufträge nicht mehr geändert werden (vgl. Bild 2.3).

Läger entkoppeln in variantenarmen Wertströmen Bedarfe und Bedarfsdecker. Der Auftragserzeugung und Terminierung kommt eine geringe Bedeutung zu (Erlach 2020, S. 52–54). Mit steigender Variantenanzahl steigt auch die Bedeutung der Terminierung einzelner Aufträge, insbesondere, wenn diese zur Komplettierung mehrstufiger Produkte benötigt werden.

### ***Auftragsfreigabe***

Die *Auftragsfreigabe* bestimmt, ab wann die Produktion einen Auftrag bzw. Arbeitsgang bearbeiten darf. In der Regel werden bei Freigabe die für den Auftrag notwendigen Artikel bereitgestellt und dem Auftrag zugeordnet (Pufferbestand bzw. reservierter Bestand). Die Freigabe kann sofort nach Auftragserzeugung, nach Soll-Starttermin, dem Bestand oder der Belastung innerhalb eines Bereichs der Produktion erfolgen. (Lödding 2016, S. 339–340)

Die Auftragsfreigabe aus der Warteschlange erfolgt in wertstromorientierten Produktionen üblicherweise bestandsregelnd. Um die Planung und Steuerung möglichst einfach zu halten, konzentriert sich die Bestandsregelung auf die Engpässe der Produktion. Durch die festgelegten Bestandshöhen ergeben sich stabile Durchlaufzeiten. (Erlach 2020, S. 259–262; Vollmann et al. 2005, S. 352–354) Insbesondere bei mehrstufigen Variantenprodukten muss die verzögerte Freigabe eines zuliefernden Auftrags, z.B. durch Störungen in der Produktion, mit den Freigaben der anderen zuliefernden Aufträge synchronisiert werden, um Fehlteile, beispielsweise in der Montage, zu vermeiden.

### ***Reihenfolgebildung***

Die Reihenfolgebildung entscheidet, welcher Auftrag im Pufferbestand eines Arbeitssystems als nächstes bearbeitet wird. Passen Ist- und Soll-Reihenfolge zueinander, führt dies in der Regel zu einer höheren Termintreue und Durchlaufzeiten mit geringer Streuung. Je geringer die Pufferbestände an einem Arbeitssystem sind, desto geringer ist die Bedeutung der Reihenfolgebildung für die logistische Zielerreichung. (Lödding 2016, S. 507–509; Wiendahl 2011, S. 147; Nyhuis et al. 2012, S. 142; Hopp et al. 2011, S. 521)

Aufgrund der hohen Turbulenzwirkung von Reihenfolgevertauschungen sollen diese in der wertstromorientierten Produktion unter allen Umständen vermieden werden. Bestehen technische und organisatorische Reihenfolgerestriktionen, werden diese bereits in der Reihenfolgeplanung, z.B. durch Kampagnenbildung, berücksichtigt. (Erlach 2020, S. 260–261, 247–249) Insbesondere bei fehlenden Komplettierern in mehrstufigen Produkten können gezielte eingesetzte Reihenfolgevertauschungen in der Steuerung die Termintreue gegenüber dem Kunden positiv beeinflussen.

### **Kapazitätssteuerung**

Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es, kurzfristig über den Einsatz der Kapazitäten zu entscheiden und damit den Ist-Abgang zu regeln. Voraussetzung für eine solche Kapazitätssteuerung ist vorhandene Kapazitätsflexibilität. Von der Kapazitätssteuerung abzugrenzen ist die Kapazitätsplanung, welche in der Regel langfristig das notwendige Kapazitätsangebot zur Erfüllung der Aufträge im Voraus festlegt und damit den Soll-Abgang bestimmt. (vgl. Lödding 2016, S. 531; Vollmann et al. 2005, S. 373–390)

Eine wertstromorientierte Produktion ist strukturfixiert. Aufgrund des hohen logistischen und organisatorischen Aufwands ist eine dynamische Zuordnung von Aufträgen zu alternativen internen oder externen Arbeitssystemen nicht vorgesehen (Erlach 2020, S. 262). Die nivellierende Auftragserzeugung regelt mittelfristige Bedarfsschwankungen aus. Kurzfristige Rückstände gleicht die vorgehaltene Kapazitätsflexibilität, z.B. in Form von Überstunden oder Zusatzschichten der Mitarbeiter aus (Erlach 2020, S. 277; Lödding 2016, S. 565–566). Um die vorhandene Flexibilität gezielt einsetzen zu können, ist eine exakte Überwachung eventueller Rückstände notwendig.

### **Fazit**

Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass der Bestand als gegenwartsbezogene Regelgröße geeignet ist, das Durchlaufzeitverhalten der Produktion effektiv zu regeln. Zudem beeinflusst der Rückstand direkt die Zuverlässigkeit einer Fertigung. Er sollte daher als zweite Regelgröße (mit der Kapazität als Stellgröße) verwendet werden. (Wiendahl 2011, 168, 171–172; vgl. Yu 2001, S. 41–42; Wiendahl 2002, S. 206–211). Eine geeignete Analyseverfahren sollte daher sowohl Bestand als auch Rückstand gezielt ermitteln und darstellen.

### **3.3.4 Kontinuierliche Systementwicklung**

Wie in Abs. 2.2.4 dargestellt, entwickeln sich komplexe adaptive Systeme stets mit und in ihrer Umwelt. Aufgabe eines Produkt-Produktionssystems ist es, vom Markt nachgefragte Produkte mit der entsprechenden Logistikeffizienz herzustellen. Dazu ist es notwendig, sich kontinuierlich an den veränderlichen Markt anzupassen. Vom Kunden nachgefragte Artikel bzw. Produkte stellen die zentralen Outputobjekte der internen Produktion dar. Eine Verbesserung im logistischen Sinne erhöht den Zielerreichungsgrad in einer oder mehreren Dimensionen, ohne den Zielerreichungsgrad der anderen Dimensionen zu reduzieren. Eine Verbesserung ist damit beispielsweise die Reduzierung der Durchlaufzeit bei gleicher Termintreue und Auslastung.

Eine geeignete Analyseverfahren unterstützt bei Auswahl und Priorisierung von Veränderungen. Der Abschnitt stellt die in der Wertstrommethode übliche Analysen und Kennzahlen zur Identifikation von möglichen bzw. notwendigen Veränderungen dar. Zudem zeigt er auf, welche Besonderheiten bei der wertstromorientierten Variantenfertigung zu beachten sind. Die Anpassungen eines Wertstroms lassen sich anhand des jeweiligen Planungshorizonts in drei Planungsebenen unterteilen (Erlach 2020, S. 271–272).

#### ***Langfristige Planung***

Inhalt der langfristigen Planung ist beispielsweise die Anpassung der Dispositionsstrategie oder gegebenenfalls des gesamten Wertstroms, inklusive einer Neudimensionierung der Kapazitäten. Notwendig wird dies bei grundsätzlich geänderten Kundenbedarfen oder neuen Produktvarianten. Die Wertstromanalyse und das darauffolgende Wertstromdesign unterstützen eine solche Veränderung. (Erlach 2020, S. 270)

Zur Klassifizierung der Produktvarianten und Ableitung der Dispositionsstrategie verwendet die Wertstromanalyse die gängige ABC-Analyse (Erlach 2020, S. 137). Bei mehrstufigen variantenreichen Produkten kann die Vielfalt an unterschiedlichen Stellen im Wertstrom entstehen. In der wertstromorientierten Variantenfertigung sollte die Vielfalt daher für jede Komponentenfamilie separat dargestellt werden.

Über die Zeitlinie der Wertstromanalyse und deren Summen lassen sich einfach Potenziale zur Reduzierung der Durchlaufzeiten ermitteln (Erlach 2020, S. 105). Bei Wertströmen mit

zahlreichen Wertstromzweigen, wie in der mehrstufigen Variantenfertigung üblich, wird die Darstellung unübersichtlich. Zur Bestimmung des durchlaufzeitbestimmenden Pfads müssen mehrere Zeitlinien miteinander verglichen werden. Für umfangreiche mehrstufige Produkte sollte die Wertstromdarstellung daher um ein zeitlich skaliertes Diagramm zur Darstellung der Durchlaufzeit ergänzt werden.

### ***Mittelfristige Planung***

Zentrale Aufgabe der mittelfristigen Planung ist die Nivellierung der Produktion. Dazu gilt es, die Kundenaufträge in nivellierte Produktionsaufträge umzusetzen und deren Position in der Warteschlange zu planen. Um den gleichmäßigen Produktionsfluss nicht zu stören, sollten nach Auftragsfreigabe keine Änderungen der Reihenfolge mehr erfolgen. (Erlach 2020, S. 272–273)

In der Betriebspraxis werden dennoch häufig Eilaufträge angenommen, die zu Turbulenzen in der Abwicklung führen. Dazu zählen beispielsweise kundenindividuell montierte Ersatzteile. Der Anteil solcher Eilaufträge sollte daher kontinuierlich über Kennzahlen erfasst werden, um das Produktionssystem an den relevanten Stellen anpassen zu können.

### ***Kurzfristige Planung***

Aufgabe der kurzfristigen Feinplanung ist der Ausgleich des Produktionsmixes und die Freigabe der Aufträge. In der Regel erfolgt die Freigabe bestandsregelnd anhand des Engpasses. (Erlach 2020, S. 272–273)

In der variantenreichen Produktion können sich beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Bearbeitungszeiten Engpässe dynamisch und kurzzyklisch verändern. Die Analyse sollte Engpässe daher periodenbezogen und kurzzyklisch ermitteln.

### ***Fazit***

Die Wertstrommethode verfügt über grundlegende Werkzeuge, um notwendige Veränderungen des Systems zu identifizieren. Um zielgerichtet Veränderungen für die wertstromorientierte Variantenfertigung ableiten zu können, sollten die Werkzeuge jedoch insbesondere um Elemente zur Identifikation dynamischer Veränderungen erweitert werden.



### 3.4 Zwischenfazit und Handlungsbedarf

Schwerpunkt der Arbeit bildet die Analyse der Dispositionskomplexität einer Variantenfertigung in den Aspekten Struktur und Verhalten. Die Arbeit beschränkt sich auf die Analyse der wertstromorientierten Variantenfertigung. Dazu zählen Variantenfertiger, die das Organisationsprinzip der schlanken Produktion einsetzen sowie eine strategische Ausrichtung als Variantenoptimierer verfolgen.

Theoretische Grundlage der Systemanalyse ist das klassische Systemverständnis, wobei relevante Erkenntnisse der Komplexitätsforschung ausdrücklich berücksichtigt werden. Methodische Grundlage bildet die Wertstromanalyse. Um die Besonderheiten der wertstromorientierten Variantenfertigung ausreichend zu berücksichtigen, ist es notwendig, die Analysemethode hinsichtlich Struktur- und Verhaltensbeschreibung zu erweitern.

Die Einführung und Detaillierung der drei Klassen Artikel, Auftrag und Arbeitssystem sowie deren Spezialisierungen modelliert die Struktur einer Variantenfertigung detailliert. Die Unterscheidung von Produktionssegmenten und -modulen erlaubt es, die Struktur modularer Produkte geeignet abzubilden.

In der auftragsgesteuerten Variantenfertigung nimmt die Bedeutung von Terminen gegenüber der Serienfertigung zu. Mit Hilfe der logistischen Kennzahlen, dem Trichtermodell und den logistischen Kennlinien lassen sich das Verhalten einer solchen Produktion beschreiben und die Einflüsse struktureller Veränderungen abschätzen. Mit Hilfe des Modells der Fertigungssteuerung lassen sich die zentralen Regelgrößen einer solchen Produktion systematisch herleiten. Die Wertstrommethode bietet bereits grundlegende Werkzeuge zur Unterstützung der kontinuierlichen Systementwicklung.

Der Handlungsbedarf ergibt sich insbesondere durch die besonderen Eigenschaften der betrachteten variantenreichen Produkte. Um solche Produkte wirtschaftlich herstellen zu können, werden modulare Produktstrukturen eingesetzt. Im Produktionsbetrieb führen diese modularen Strukturen zu mehrstufigen, voneinander abhängigen Auftragsnetzen. Durch diese Vernetzung beeinflussen daher die Kapazität und mögliche Kapazitätsstörungen einzelner Arbeitssysteme nicht nur einzelne Produkte, sondern gegebenenfalls das

gesamte Produktionsprogramm. Der Handlungsbedarf lässt sich anhand der vier Systemaspekte gliedern:

**Struktur:** Die drei grundlegenden Klassen Artikel, Auftrag und Arbeitssystem unterstützen dabei, die Systemstruktur anhand bestehender Daten eindeutig abzubilden. Ein systematisches Vorgehensmodell, vergleichbar mit dem eindeutigen Vorgehen in der Wertstromanalyse, ist darauf aufbauend zu entwickeln.

**Hierarchie:** Die Unterscheidung von Segmenten und Modulen unterstützt dabei, mehrstufige Produkt-Produktionssysteme geeignet abzubilden. Eine einheitliche Visualisierung, angelehnt an die Wertstromdarstellung, ist notwendig, um die Ergebnisse adressatengerecht zu visualisieren.

**Funktion:** Das Trichtermodell in Kombination mit den logistischen Kennlinien und dem Modell der Fertigungssteuerung ist gut geeignet, um die Wirkzusammenhänge darzustellen. Aufgrund der Vielfalt an möglichen Kennzahlen zur Abbildung der Zusammenhänge ist ein priorisiertes Vorgehensmodell notwendig, um die relevanten Abweichungen zu identifizieren.

**Entwicklung:** Die Priorisierung der notwendigen Systemveränderungen anhand bestehender Engpässe und mit Hilfe von Heuristiken ist grundsätzlich sinnvoll. Ein systematisches und systemtheoretisch fundiertes Vorgehen zur Analyse und Priorisierung ist zu entwickeln.

# 4 Bestehende Ansätze zur Analyse der Dispositionskomplexität

Ziel des Kapitels ist es, bestehende Modelle auf deren Eignung zur Analyse der Dispositionskomplexität zu untersuchen. Ausgehend vom beschriebenen Handlungsbedarf leitet der erste Abschnitt Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze ab. Darauf aufbauend stellt der zweite Abschnitt diese Ansätze vor und bewertet sie anhand der Kriterien. Der abschließende Abschnitt fasst die Ergebnisse in einer kritischen Würdigung zusammen und leitet den offenen Forschungsbedarf ab.

## 4.1 Anforderungen an bestehende Analyseansätze

Anhand der theoretischen Grundlagen und des abgeleiteten Handlungsbedarfs lassen sich die Anforderungen an bestehende Ansätze zur Analyse einer wertstromorientierten Variantenfertigung konkretisieren. Die Anforderungen gliedern sich in die untersuchten Aspekte des Systems, den Betrachtungsbereich der Analyse sowie methodische Merkmale.

### **Aspekte**

**Mehrstufiges Produkt-Produktionssystem in Struktur und Verhalten:** Das im vorherigen Kapitel dargestellte Grundmodell zeigt die vielfältigen Verbindungen zwischen Produkt und Produktion sowie zwischen deren Struktur und Verhalten. (Abs. 3.2) Eine aussagekräftige Analyse sollte die Strukturen variantenreicher, mehrstufiger Produkte abbilden und mit den zu deren Herstellung notwendigen Produktionsstrukturen in Verbindung bringen. Die Analyse sollte zudem die durch die Produktnachfrage entstehenden Bedarfe sowie das daraus resultierende Verhalten der Produktion abbilden.

### ***Betrachtungsbereich***

**Quantifizierung der logistischen Zielerreichung:** Eine höhere Zielerreichung der Fabrikziele steigert langfristig die Chancen des Produkt-Produktionssystems am Markt zu bestehen. Eine höhere logistische Zielerreichung erhöht in der Regel die Wirtschaftlichkeit. Im Gegensatz zu reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen stellt die Betrachtung der Fabrikziele und der logistischen Zieldimensionen die Zielkonflikte der Produktion differenzierter dar. (Abs. 3.3.1) Daher sollte ein geeigneter Ansatz die logistische Zielerreichung quantitativ bewerten.

**Wertstromorientierte Variantenfertigung:** Die Anforderungen an ein Produkt-Produktionssystem hängen von der zugrundeliegenden Form der Auftragsabwicklungsstruktur, des Organisationskonzepts sowie der Standardisierungsstrategie ab. Eine Berücksichtigung dieser grundlegenden Unterschiede ist notwendig, um eine anwendungsorientierte und durchführbare Methode zu entwickeln. (Abs. 2.1.2) Ein geeigneter Ansatz sollte daher die Besonderheiten der wertstromorientierten Variantenfertigung berücksichtigen.

### ***Methodenmerkmale***

**Soll-Zustandsorientierte Analyse:** Soll-zustandsorientierte Analysen unterstützen die systematische und zielgerichtete Analyse. Zur Entwicklung eines solchen Soll-Zustands eignen sich Heuristiken, mit denen sich trotz unvollständiger Informationen geeignete Lösungen skizzieren lassen. Um einer naiven und fehlerhaften Anwendung der Heuristiken vorzubeugen, sollten diese auf einem soliden theoretischen und/oder empirischen Fundament aufbauen und bestehende Ursache-Wirkungs-Beziehungen berücksichtigen. (Abs. 2.3.2) Ein geeigneter Ansatz sollte eine soll-zustandsorientiertes Analyseverfahren verwenden und dabei theoretisch oder empirisch fundierte Heuristiken einsetzen.

**Identifikation logistischer Engpässe:** Eine Analyse mit dem Ziel der Systemverbesserung soll bei der Ermittlung von Verbesserungsmöglichkeiten unterstützen. Verbesserungen an Engpässen führen am ehesten zu Verbesserungen des Gesamtsystems. Je konkreter eine Analyse bestehende logistische Engpässe aufzeigt und quantifiziert, desto zielgerichteter können Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet werden. (Abs. 2.2.3) Ein geeigneter Ansatz sollte daher die Identifikation und Quantifizierung von Engpässen unter Berücksichtigung des Zielsystems ermöglichen.

**Quantitative Ergebnisvisualisierung:** Überblicksdarstellungen mit geeigneter Syntax und Semantik stellen zahlreiche Aspekte eines Systems gleichzeitig dar und unterstützen dabei, die vielfältigen Zusammenhänge zu kommunizieren. Detaildarstellungen zeigen einzelne Aspekte eines solchen Systems detailliert qualitativ und quantitativ und helfen bei der Bewertung von Einzelmaßnahmen. (Abs. 2.4.4) Ein geeigneter Ansatz sollte daher sowohl Überblicks- als auch Detaildarstellungen zur qualitativen und quantitativen Visualisierung des untersuchten Systems verwenden.

**Iteratives Vorgehen:** Die Zielerreichung in umfangreichen Produkt-Produktionssystemen wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Die Datenaufbereitung und Quantifizierung der Faktoren verursachen in der Praxis in der Regel erhebliche Aufwände. In stabilen Situationen lassen sich bereits anhand der aktuellen Istwerte oder durch die Berechnung von Mittelwerten die Hauptursachen ermitteln. (Abs. 2.3.2 und 2.4.3) In dynamischen Situationen hingegen ist eine detaillierte Analyse des zeitlichen Verlaufs einzelner Faktoren notwendig. Um den Analyseaufwand gering zu halten, sollte ein geeigneter Ansatz daher ein iteratives Vorgehen für die situationsangepasste Datenanalyse beinhalten.

## 4.2 Bewertung relevanter Analyseansätze

Bestehende Ansätze betrachten in der Regel ein Element des Ordnungsrahmens detailliert. Daran angelehnt gliedert der Abschnitt die bestehenden Ansätze nach struktur- und verhaltensorientierten Ansätzen sowie nach Produkt- und Produktionsschwerpunkt. Ansätze, die mehrere Aspekte betrachten, sind unter ihrem jeweiligen Schwerpunkt eingeordnet. Die dargestellten Ansätze weisen grundsätzlich eine Übereinstimmung mit mehreren der oben beschriebenen Anforderungen auf. Daneben werden Partialansätze vorgestellt. Solche Partialansätze erfüllen nur einzelnen Anforderungen, diese allerdings besonders gut.

### 4.2.1 Strukturorientierte Analyseansätze

Strukturorientierte Ansätze lassen sich in Ansätze mit Produkt- oder Produktionsschwerpunkt unterscheiden.

### ***Strukturorientierte Analyseansätze mit Produktschwerpunkt***

**Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten:** Schuh (1989) entwickelt einen Ansatz zur Analyse und produktionsgerechten Gestaltung variantenreicher Serienprodukte. Der Ansatz umfasst eine umfangreiche, mehrstufige Kostenbewertung der Variantenvielfalt. Zur Visualisierung der Analyseergebnisse entwickelt Schuh den Variantenbaum, der Variantenvielfalt sowie Montagereihenfolge in einer Grafik darstellt. Der Variantenbaum kann zusätzlich um Kosteninformationen ergänzt werden. (Schuh 1989, S. 45–50, 89–111, 139) Insbesondere die systematische Verdichtung der Kennzahlen bildet eine geeignete Ausgangsbasis für die iterative Datenanalyse (Schuh 1989, S. 116). Eine detaillierte logistische Analyse der bestehenden Produktion und bestehender Engpässe ist jedoch nicht Teil des Ansatzes.

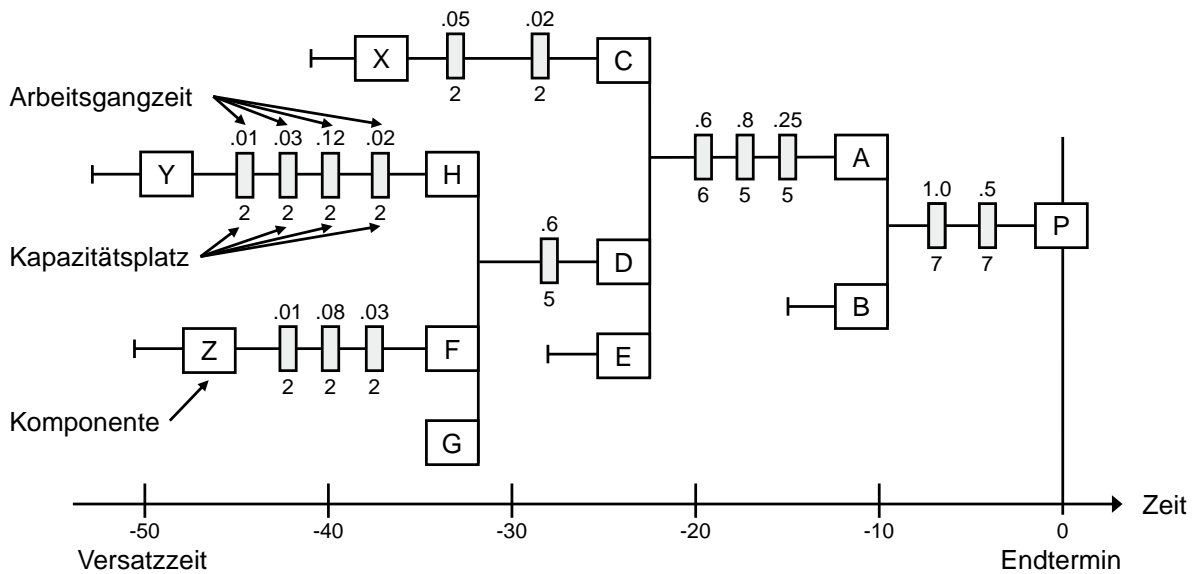
**Bewertung der Produktkomplexität:** Nußbaum (2011) bewertet die Produktkomplexität aus Produkt- und Prozesssicht. Es wird ein Spannungsfeld mit den vier Dimensionen Produktprogramm, Produktarchitektur, Supply Chain und Produktion aufgebaut. Für jede Dimension wird anhand der zentralen Dichotomie aus Economy of Scale und Scope eine Zielrichtung entwickelt. Die quantitative Bewertung der Zielerreichung erfolgt über dafür entwickelte Kennzahlen. Zur Visualisierung werden hauptsächlich Detaildarstellungen eingesetzt (vgl. Abs. 2.4.4). (Nußbaum 2011, S. 197–200) Die Gliederung des Betrachtungsbereichs und die Berücksichtigung von konkurrierenden Zielen unterstützen die Entwicklung und Prüfung geeigneter Heuristiken (Nußbaum 2011, S. 110–118). Die hohe Informationsverdichtung und die geringe Nutzung mehrstufiger Strukturierungen erschweren eine Identifikation konkreter logistischer Engpässe. Die Analyse des Systemverhaltens erfolgt nur knapp.

**Reduzierung produktvarianteninduzierter Komplexität:** Brosch (2014) entwickelt eine Methode zur Reduzierung der produktvarianteninduzierten Komplexität, die sowohl die Produkte als auch die Prozesse der Value Chain berücksichtigt. Es werden strategische Handlungsfelder identifiziert, anhand derer das bestehende System zu untersuchen ist. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden eingesetzt, um insbesondere über die Verschiebung des Variantenentstehungspunktes die Produktvielfalt geeignet zu beeinflussen. (Brosch 2014, S. 114, 117, 153). Der Vielfaltstrichter bildet eine geeignete Ausgangsbasis,

um die Variantenentstehung über den Zeitverlauf darzustellen (Brosch 2014, S. 108). Produkt- und Produktionsverhalten werden in der Methode kaum berücksichtigt. Es fehlt eine detaillierte Analyse des Einflusses des Verhaltens auf die logistischen Ziele.

**Analyse der Produktportfoliokomplexität:** Neis (2015) entwickelt einen Ansatz, der die Vergleichbarkeit von Produkten und Produktvarianten in umfangreichen Produktportfolios unterstützt. Der Ansatz setzt dazu Methoden der Datenexploration sowie des Data Minings ein. Schwerpunkt bilden Methoden zur Datenaufbereitung (Klassifizierung, Strukturierung) und Auswertung (Clusterbildung, Distanzmaße). (Neis 2015, S. 42–43, 91–100) Die Grundidee der über mehrere Abstraktionsebenen durchgeführten Clustering zur Bildung von Produktfamilien wird für die vorliegende Arbeit übernommen (Neis 2015, S. 100–104). Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Abhängigkeit zwischen Struktur und Verhalten sowie von Produkt und Produktion lässt sich mit Hilfe des Ansatzes die Dispositionskomplexität nur unvollständig beschreiben. Das Vorgehensmodell des pragmatischen Ansatzes bleibt vage.

Insbesondere zur Visualisierung der Produktstruktur existiert ein relevanter Partialansatz. Zur ihrer Darstellung eignet sich der von Schönsleben (2020, S. 32, 36) verwendete und in Bild 4.1 dargestellte **Durchlaufplan** (vgl. Aufbauübersicht und Fristenplan nach Wiendahl 2014, S. 273 sowie mehrstufiger Herstellauftrag in Wiendahl et al. 2020, S. 354–355). Ein Durchlauf- oder Prozessplan stellt die Herstellschritte anhand der Struktur eines (mehrstufigen) Artikels, inklusive der zur Produktion notwendigen Arbeitsgänge, auf der Zeitachse dar. Gegenüber der Stücklistendarstellung zeigt der Durchlaufplan zusätzlich die zeitliche Dimension. Allerdings stellt er jeweils nur ein Produkt dar und ist daher zur Darstellung ganzer Produktfamilien mit vielen Produkten anzupassen.



**Bild 4.1** Durchlaufplan (aus Schönsleben 2020, S. 32)

### **Strukturorientierte Analyseansätze mit Produktionsschwerpunkt**

**Komplexe Produktionsstrukturen:** Fricker (1996) entwickelt ein quantitatives Modell zur Abbildung, Analyse und Gestaltung komplexer Produktionsstrukturen. Schwerpunkt bildet dabei die Varietät, welche die Vielfalt der Objekte einer Menge beschreibt. Aufbauend auf einem Objektmodell werden eine objektorientierte Visualisierung sowie Aussagen zur Gestaltung effektiver Komplexität abgeleitet. Die Ableitung der Gestaltungsstrategien erfolgt anhand einer Gegenüberstellung von Störvarietät und Reaktionsvarietät für sogenannte Varietätsbilanz-Messstellen. (Fricker 1996, S. 109, 121) Die Vorgehensweise zur Untersuchung und Gestaltung der Komplexität inklusive der objektorientierten Modellierung bildet einen geeigneten Ausgangspunkt für die zu entwickelnde Methode (Fricker 1996, S. 110–115). Der hohe Abstraktionsgrad der Methode erlaubt ein großes Einsatzspektrum. Der dadurch entstehende Modellierungsaufwand erschwert allerdings die praktische Anwendung für den konkreten Anwendungsfall der wertstromorientierten Variantenfertigung.

**Integriertes Komplexitätsmanagement:** Budde (2016) entwickelt ein Modell zur Bewertung der Komplexität in den Bereichen Kunden- und Marktkomplexität, Produktportfolio- und -architekturkomplexität sowie der Komplexität in der Herstellkette. Ziel des Mo-



dells ist ein ganzheitliches Vorgehen zur Messung und Bewertung von Aufwand und Nutzen der Komplexität unter Produkt- und Produktionsaspekten. Die Identifikation der Komplexitätstreiber erfolgt in den Bereichen Struktur („Masse/Detail“) sowie Verhalten („Dynamik“). Darauf aufbauend wird ein Wirkmodell aufgebaut, welches die Beziehungen der Treiber zueinander darstellt. Die Beziehungen werden zu Beziehungsfamilien zusammengefasst, anhand derer Kennzahlen zum Aufwand-Nutzen-Verhältnis abgeleitet und die Effekte quantifiziert werden. (Budde 2016, S. 132–137). Die in der Methode entwickelten Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind gut geeignet, um mögliche Heuristiken zu prüfen und Interdependenzen zu identifizieren (Budde 2016, S. 154–155). Grundsätzliche Wirkbeziehungen werden ausführlich dargestellt, wobei eine ganzheitliche Visualisierung für einen konkreten Anwendungsfall fehlt. Die Methode berücksichtigt die logistischen Wechselwirkungen zwischen Produktstruktur und logistischen Kennzahlen nur knapp. Die starke Verdichtung der Kennzahlen erschwert eine Identifikation konkreter Verbesserungspotenziale.

**Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen:** Heinicke (2017) entwickelt ein Bewertungskonzept für Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung der Resilienz. Ausgehend von der Dichotomie aus effektiver Strukturgestaltung und effizientem Strukturbetrieb wird ein regelkreisbasiertes quantitatives Kennzahlenmodell zur Prüfung und Überwachung der Produktionsstruktur entworfen. Die Visualisierung der Analysen erfolgt mit klassischen Mitteln, wie Tabellen, Diagrammen und Layoutdarstellungen. (Heinicke 2017, S. 17, 46–50, 77, 111–119) Aus dem Ansatz übernommen wird der Leitgedanke der kontinuierlichen Strukturüberprüfung (Heinicke 2017, S. 71–72). Der Ansatz konzentriert sich auf die Kostenbewertung. Die Einflüsse der Struktur auf die logistische Leistung wird nur knapp dargestellt. Zudem erfolgt die Untersuchung der logistischen Leistung nur unvollständig, da die logistische Kenngröße Termintreue aus dem Betrachtungsbereich ausgeschlossen wurde (Heinicke 2017, S. 71).

**Potenzial der Fertigungssegmentierung:** Luckert (2018) entwickelt eine Methode zur Ermittlung und Bewertung des Potenzials der Fertigungssegmentierung mit dem Ziel, die logistische Leistungsfähigkeit der Produktion zu erhöhen. Zunächst stellt die Arbeit Ver-

fahren der Fertigungssegmentierung dar. Mit Hilfe einer Simulation werden die so erzeugten Strukturen anschließend bewertet sowie in Form von Überblicks- und Detaildarstellungen visualisiert. Die Umsetzung in ein Softwarewerkzeug erleichtert den Praxiseinsatz. (Luckert 2018, S. 31–39, 145–154, 169–173) Insbesondere die entwickelte zweistufige Visualisierung ist vielversprechend. So lassen sich Fertigungssegmenten mit bzw. ohne die einzelnen Arbeitssysteme darstellen. Dies unterstützt die Orientierung in umfangreichen Strukturen. (Luckert 2018, S. 170–171) Mit Hilfe der Methode lassen sich systematisch Segmentierungskonzepte entwerfen und bewerten. Sie bietet jedoch nur wenig Unterstützung bei der Analyse konkreter Engpässe in bereits bestehenden Strukturen.

**Wertstromanalyse:** Erlach (2020) entwickelt, basierend auf den Vorarbeiten von Rother et al. (2009), mit der Wertstromanalyse eine Methode zur umfassenden Momentaufnahme einer Fabrik in den Bereichen Kundentakt, Kundenbedarfsschwankung, Produktionsprozesse, Materialfluss sowie Auftragsabwicklung. Aufbauend auf der Analyse lassen sich unmittelbar Verbesserungspotenziale hinsichtlich Durchlaufzeit sowie Taktabstimmung ermitteln. (Erlach 2020, Kap. 2). Die Wertstromanalyse bildet eine zentrale Grundlage der vorliegenden Arbeit. Die Wertstromdarstellung bildet die Ergebnisse übersichtlich einschließlich der Geschäftsprozesse ab. Jedoch beziehen sich die dargestellten Kennwerte in der Regel auf den jeweiligen Mittelwert einer Periode. Für eine Grobanalyse reicht dies aus. Die Dynamik der Produktion, beispielsweise eine geringe Termintreue aufgrund von zeitweiligen Rückständen oder Störungen, kann dadurch jedoch nicht ausreichend genau abgebildet werden. Bei umfangreichen, mehrstufigen Produktstrukturen verliert die Wertstromdarstellung zudem ihre Übersichtlichkeit. (vgl. ausführlich Abs. 3.1)

#### **4.2.2 Verhaltensorientierte Analyseansätze**

Die Gliederung der verhaltensorientierten Ansätze erfolgt analog zu den strukturorientierten Ansätzen in solche mit Produkt- oder Produktionsschwerpunkt.

##### ***Verhaltensorientierte Analyseansätze mit Produktschwerpunkt***

**Analyse logistischer Merkmale komplexer Serienprodukte:** Wahlers (1998) entwickelt ein Verfahren zur Analyse, Visualisierung und Gestaltung mehrstufiger Prozessnetze für die Serienfertigung. Die Visualisierungen stellen Mittelwerte, Abweichungen sowie die

Streuung der Abweichung dar. Die Darstellung als mehrstufiges Netz ermöglicht es, die Auswirkungen von Terminabweichungen einzelner Prozesse auf die Terminabweichung des gesamten Netzes darzustellen. Schwerpunkt bilden die Analyse und Verbesserung der logistischen Zielgrößen Lieferzeiten und Liefertermintreue (Wahlers 1998, S. 8–9, 73–76). Die Erweiterung des Fristenplans zum logistischen Produktmodell und damit zur Darstellung des logistischen Verhaltens dient als Grundlage für das in dieser Arbeit entwickelte Produktnetz (Wahlers 1998, S. 52). Die durch die Produktstruktur hervorgerufene Vernetzung einzelner Arbeitssysteme innerhalb der Produktion sowie die Wirkung von Engpässen werden nicht betrachtet.

**Analyse des Bestellverhaltens:** Barthel (2006) entwickelt, basierend auf der Analyse von Zeitreihen, ein Modell zur Bewertung des Bestellverhaltens mit den Hauptdimensionen Mengen- und Terminänderung. Die Analyse bewertet das Bestellverhalten mit Hilfe von Güteklassen und identifiziert eigen- und fremdinduzierte Turbulenzkeime. Die so gewonnenen Informationen dienen als Basis für Vereinbarungen zwischen Kunde und Lieferant. Die Visualisierung und Kommunikation der Vereinbarung erfolgt in Form von Hüllkurven. Der Ansatz berücksichtigt in besonderem Maß die Notwendigkeit, eine für beide Vertragspartner geeignete Flexibilität zu vereinbaren. (Barthel 2006, 82–83, 152–153) Insbesondere die Grundideen der iterativen zeitreihenbasierten Analyse sowie die Klassifizierung von Kundenaufträgen anhand der relativen Lieferzeit wird übernommen. So verursachen beispielsweise neue Aufträge innerhalb der Frozen Zone deutlich höhere Turbulenz als Aufträge mit längerer Vorlaufzeit. (Barthel 2006, S. 87–101) Basis der Arbeit von Barthel sind Mengen- und Terminänderungen bei Kundenaufträgen. Hingegen geht die vorliegende Arbeit aufgrund insgesamt kurzer Lieferzeiten von geringen Änderungsquoten aus. Aufgrund der unterschiedlichen Grundannahmen lassen sich nur einzelne Elemente auf die vorliegende Arbeit übertragen.

**Messung der Nachfragedynamik und logistischen Agilität:** Jacobsen (2006) entwickelt eine Methode zur Analyse der Nachfragedynamik sowie der ihr gegenüberstehenden logistischen Agilität der Produktion für die Großserienfertigung. Die Nachfragedynamik wird in den Dimensionen Volatilität sowie Vorhersagegüte und die logistische Agilität in

den Dimensionen Reichweite und Zugangsvolatilität ermittelt und visualisiert. Eine Portfoliodarstellung aus Nachfrage- und Zugangsvolatilität stellt die Synchronität beider Dimensionen dar, um daraus mit Hilfe von Normstrategien geeignete Maßnahmen abzuleiten. (Jacobsen 2006, S. VIII, 75, 116) Der in dieser Arbeit verwendete Flexibilitätskennwert adaptiert die Messung der Zugangsvolatilität (Jacobsen 2006, S. 92–95). Aufgrund der Ausrichtung auf die Lagerfertigung für die Großserie ohne direkten Kundenauftragsbezug lassen sich die entwickelten Normstrategien jedoch nicht direkt für die Variantenfertigung übernehmen (Jacobsen 2006, S. 75).

### ***Verhaltensorientierte Analyseansätze mit Produktionsschwerpunkt***

**Engpassorientierte Logistikanalyse:** Wiendahl et al. (1998) entwickeln basierend auf dem Trichtermodell und den logistischen Kennlinien einen Ansatz zur Analyse und Konfiguration des Durchlaufzeitverhaltens einer Produktion. Die Darstellung des Verhaltens erfolgt vor allem über Durchlaufdiagramme, Betriebskennlinien und Histogramme. Der Fokus der Engpassanalyse liegt auf Arbeitssystemen mit hoher Wirkung auf die Gesamtdurchlaufzeit und damit auf der Ressourcensicht. (Wiendahl et al. 1998, S. 1–31) Das Trichtermodell ist für die vorliegende Arbeit ein zentrales Modellierungselement, um die logistischen Zusammenhänge an einem Arbeitssystem zu beschreiben (Abs. 3.3.2; Wiendahl et al. 1998, S. 11). Auf die Besonderheiten mehrstufiger Auftragsnetze (z.B. Kompletierer) sowie die durch die Produkt- und Produktionsstruktur begründeten strukturellen Einflüsse auf die logistische Leistung wird nur am Rande eingegangen.

**Controlling in Lieferketten:** Aufbauend auf dem Zielsystem der logistischen Lieferkette entwickeln Wiendahl et al. (2012) den Regelkreis des Logistik-Controllings mit den sechs Schritten: Zielsetzung, Planwertermittlung, Istwerterfassung, Plan/Ist-Vergleich, Abweichungsanalyse und Maßnahmenableitung. Grundlagen des Vorgehens sind das Trichtermodell, die Durchlaufdiagramme sowie die Kennlinien der Produktion und des Lagers. Eine fallweise Überprüfung der (langfristigen) logistischen Prozessfähigkeit, z.B. der Produktstruktur und des Fristenplans, wird knapp erwähnt. (Wiendahl et al. 2012, S. 14–23, 52) Neben dem Trichtermodell nutzt die vorliegende Arbeit insbesondere den Regelkreis des Logistik-Controllings sowie die differenzierte Analyse nach Sichtweisen (Wiendahl et

al. 2012, S. 14, 52). Die Visualisierungen der Auftrags- und Arbeitssystemstrukturen werden nur knapp beschrieben. Sie zeigen entweder die mehrstufige Struktur oder das einstufige Verhalten des Systems. Eine gemeinsame Darstellung von Struktur und Verhalten erfolgt nicht.

**Wertstromanalyse für Auftragsfertiger:** Koch (2018) erweitert die Wertstromanalyse nach Erlach (2010) insbesondere um den für Auftragsfertiger kritischen Terminaspekt. Dazu entwickelt Koch Verfahren zur Aufnahme und Visualisierung der für die Termintreue kritischen Faktoren Terminabweichung aus Rückstand und Reihenfolgedisziplin. Sechs Fragen identifizieren Handlungsfelder zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung. Zur Auswahl eines geeigneten Untersuchungsbereichs empfiehlt Koch die Auswertung von Rückmeldedaten. Die methodische Unterstützung der Auswertung erfolgt jedoch nur knapp. (Koch 2018, S. 36–62) Die Grundidee zur Erweiterung der Wertstromdarstellung um Rückstandskennzahlen und Informationen zur Reihenfolgebildung wird für die vorliegende Arbeit übernommen. (Koch 2018, S. 56–60) Die Analyse basiert weiterhin auf einer vor Ort-Erfassung. Bestehende Daten werden zur Analyse nicht benötigt, allerdings ist so ihr Potenzial auch nicht systematisch nutzbar.

### 4.3 Kritische Würdigung und Forschungsbedarf

Die kritische Würdigung bestehender Ansätze und die Ableitung des Forschungsbedarfs erfolgen anhand der in Abs. 4.1 definierten Anforderungen. Bild 4.2 zeigt den Erfüllungsgrad der bestehenden Ansätze hinsichtlich der untersuchten Aspekte, des Betrachtungsbereichs und der Methodenmerkmale. Partialansätze werden nicht bewertet, da diese, abgesehen von einzelnen Teilbereichen, nur eine geringe Übereinstimmung mit den Anforderungen aufweisen.

Bewertungskriterien	Aspekt		Verhalten		Betrachtungsbereich		Methodenmerkmale			
	Struktur	Struktur	Verhalten	Verhalten	Quantifizierung logistischer Ziele	Wertstromorientierte Variantenfertigung	solzustandsorientierte Analyse	Identifikation log. Engpässe	Visualisierung	Iterative Analyse
Ansatz (Autor)	Produkt	Produktion	Produktnachfrage	Produktion	Quantifizierung logistischer Ziele	Wertstromorientierte Variantenfertigung	solzustandsorientierte Analyse	Identifikation log. Engpässe	Visualisierung	Iterative Analyse
<b>Strukturorientierte Analyseansätze mit Produktschwerpunkt</b>										
Produktvarianten (Schuh 1989)	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	●
Produktkomplexität (Nußbaum 2011)	●	●	○	◐	◐	◐	◐	○	◐	○
Varianteninduz. Komplexität (Brosch 2014)	●	◐	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐
Produktportfoliokomplexität (Neis 2015)	●	○	○	○	○	◐	○	○	◐	◐
<b>Strukturorientierte Analyseansätze mit Produktionsschwerpunkt</b>										
Komp. Produktstrukturen (Fricker 1996)	○	●	○	○	○	○	◐	○	◐	◐
Integriertes Kompl.mgmt. Budde 2016)	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	◐
Produktionsstrukturen (Heinicke 2017)	○	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Fertigungssegmentierung (Luckert 2018)	◐	●	○	◐	●	◐	◐	○	◐	○
Wertstromanalyse (Erlach 2020)	◐	●	◐	◐	◐	◐	●	◐	●	○
<b>Verhaltensorientierte Analyseansätze mit Produktschwerpunkt</b>										
Kompl. Serienprodukte (Wahlers 1998)	●	○	●	◐	◐	◐	◐	○	●	◐
Bestellverhalten (Barthel 2006)	◐	○	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Nachfragedynamik (Jacobsen 2006)	○	○	●	◐	◐	○	○	◐	◐	◐
<b>Verhaltensorientierte Analyseansätze mit Produktionsschwerpunkt</b>										
Engpasso. Logistikanalyse (Wiendahl/Nyhuis 1998)	◐	◐	○	●	●	◐	◐	◐	◐	◐
Lieferkettencontrolling (Wiendahl et al. 2012)	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	●
Wertstrom f. Auftragsfertiger (Koch 2018)	◐	●	◐	●	●	◐	●	◐	●	○

Erfüllungsgrad: ● Vollständig erfüllt ◐ Teilweise erfüllt ○ Nicht erfüllt

**Bild 4.2** Bewertung bestehender Ansätze

**Aspekte:** Ansätze mit dem Schwerpunkt *Produktstruktur* untersuchen die Zusammenhänge und Ursachen der Produktvielfalt detailliert. Die Ansätze zielen eher auf eine frühe Phase innerhalb der Produktentwicklung mit großen Gestaltungsmöglichkeiten ab, jedoch ohne bekanntes Produktionssystem. Sie untersuchen die konkreten Zusammenhänge zwischen Produktvarianten und logistischen Auswirkungen auf die Disposition nicht oder nur teilweise.

Ansätze, die sich auf die Analyse der *Produktionsstruktur* konzentrieren, untersuchen die Strukturierung der Produktion hingegen detailliert. Auch bei diesen Ansätzen erfolgt die Analyse des tatsächlichen Verhaltens der Produktion sowie der Einfluss der Produkt- und Produktionsstruktur auf das Produktionsverhalten nur zum Teil.

*Verhaltensorientierte Ansätze mit Produktschwerpunkt* konzentrieren sich meist auf die genauere Prognose der Produktnachfrage sowie auf die Gestaltung der Produktion zur Reaktion auf eine ggf. nicht prognostizierbare Nachfrage. Die Analyse konkreter Engpässe, die eine schnelle Reaktion verhindern, erfolgt nicht oder nur sehr knapp.

Ansätze mit dem Schwerpunkt *Produktionsverhalten* analysieren das logistische Verhalten und die Ursachen für Abweichungen hingegen sehr detailliert und identifizieren häufig konkrete Engpässe. Der Einfluss der Vielfalt wird allerdings oft ausgeblendet (z.B. Ein-Produkt-Analysen) oder stark vereinfacht (z.B. Mittelwertbildung).

**Betrachtungsbereich:** Verhaltensorientierte Ansätze berücksichtigen die logistischen Ziele in der Regel ausführlich. Eine gemeinsame Darstellung von Struktur- und Verhaltenskennzahlen erfolgt in der Regel jedoch nicht. Dies erschwert die Bewertung von Struktureigenschaften und ihrer Wirkung auf das logistische Verhalten.

Bestehende *strukturorientierte Ansätze* analysieren die strukturellen Eigenschaften einer mehrstufigen Variantenfertigung teilweise sehr detailliert. *Verhaltensorientierte Ansätze* analysieren das Systemverhalten auch detailliert, jedoch in der Regel ohne Berücksichtigung der Besonderheiten einer flussorientierten mehrstufigen Produktion. Das zugrundeliegende Organisationskonzept und die Standardisierungsstrategie werden nur vereinzelt berücksichtigt. Keiner der bestehenden Ansätze berücksichtigt alle relevanten Besonderheiten der wertstromorientierten Variantenfertigung.

**Methodenmerkmale:** Einige Ansätze verwenden Gestaltungsaussagen und entwickeln damit einen Soll-Zustand. Insbesondere wertstromorientierte Ansätze richten die Analyse an den Gestaltungsrichtlinien aus. Keiner der Ansätze beinhaltet jedoch ein Set an günstigen Systemeigenschaften, die ausdrücklich für die Anwendung innerhalb der Systemanalyse entwickelt wurden.

Die Mehrzahl der vorgestellten Ansätze verwenden Heuristiken zur effizienten Analyse, wobei die Auswahl sowie die theoretische oder empirische Fundierung knapp bleibt. Ansätze mit umfassenden abgestimmten Heuristiken fokussieren in der Regel auf einen Systemaspekt. Ein in sich abgestimmter Satz an fundierten Heuristiken, der alle vier Systemaspekte umfasst, existiert nicht.

*Verhaltensorientierte Ansätze* verwenden mehrheitlich klar strukturierte, hierarchische Ursache-Wirkungs-Modelle und ermöglichen so die Identifikation und Quantifizierung konkreter verhaltensbedingter Schwachstellen und Engpässe. Die Ansätze konzentrieren sich dabei vor allem auf Kapazitätsengpässe. *Strukturorientierte Ansätze* quantifizieren Produkt- und Produktionsstrukturen meist nur mit geringem Bezug zum logistischen Zielsystem. Lediglich die Wertstromanalyse verbindet über den Flexibilitätsengpass die Produktionsstruktur und das logistische Verhalten miteinander. Keiner der Ansätze verwendet mehrere aufeinander abgestimmte Analysen zur Identifikation der logistisch relevanten Engpässe in der wertstromorientierten Variantenfertigung.

Die meisten Ansätze konzentrieren sich bei der Visualisierung der Analyseergebnisse auf Detaildarstellungen. Das Potenzial hochverdichteter Übersichtsdarstellungen für die Produktion nutzen hauptsächlich wertstromorientierte Ansätze. Lediglich Wahlers visualisiert Struktur und Verhalten für ein einzelnes mehrstufiges Produkt in einer Übersichtsdarstellung. Keiner der Ansätze bietet eine Visualisierung, die Struktur und Verhalten mehrstufiger Variantenprodukte gleichzeitig darstellt.

Die Mehrzahl der Ansätze erfordert umfangreiche Datenbestände in hoher Qualität, die so in der Praxis häufig nicht vorliegen oder mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können. Wertstromorientierte Ansätze konzentrieren sich auf die aufwandsarme Erhebung der aktuellen Ist-Situation. Die systematische und strukturierte Analyse bestehender Datenquellen ist dabei jedoch methodisch nicht verankert. Einzelne Ansätze verwenden ein iteratives Analyseverfahren für Teilaspekte des Systems. Ein durchgängiger Ansatz, der ein pragmatisches iteratives Vorgehen zur Datenanalyse nutzt, fehlt.

**Fazit:** Die Reflexion bestehender Ansätze zeigt den Mangel an einem analytischen Ansatz, der Struktur und Verhalten eines Produkt-Produktionssystems aus dispositiver Sicht für eine mehrstufige Variantenfertigung untersucht. Aus der Analyse bestehender Ansätze ergeben sich allerdings eine Fülle von Anregungen und Grundideen, die ein geeigneter Ansatz aufgreifen sollte.



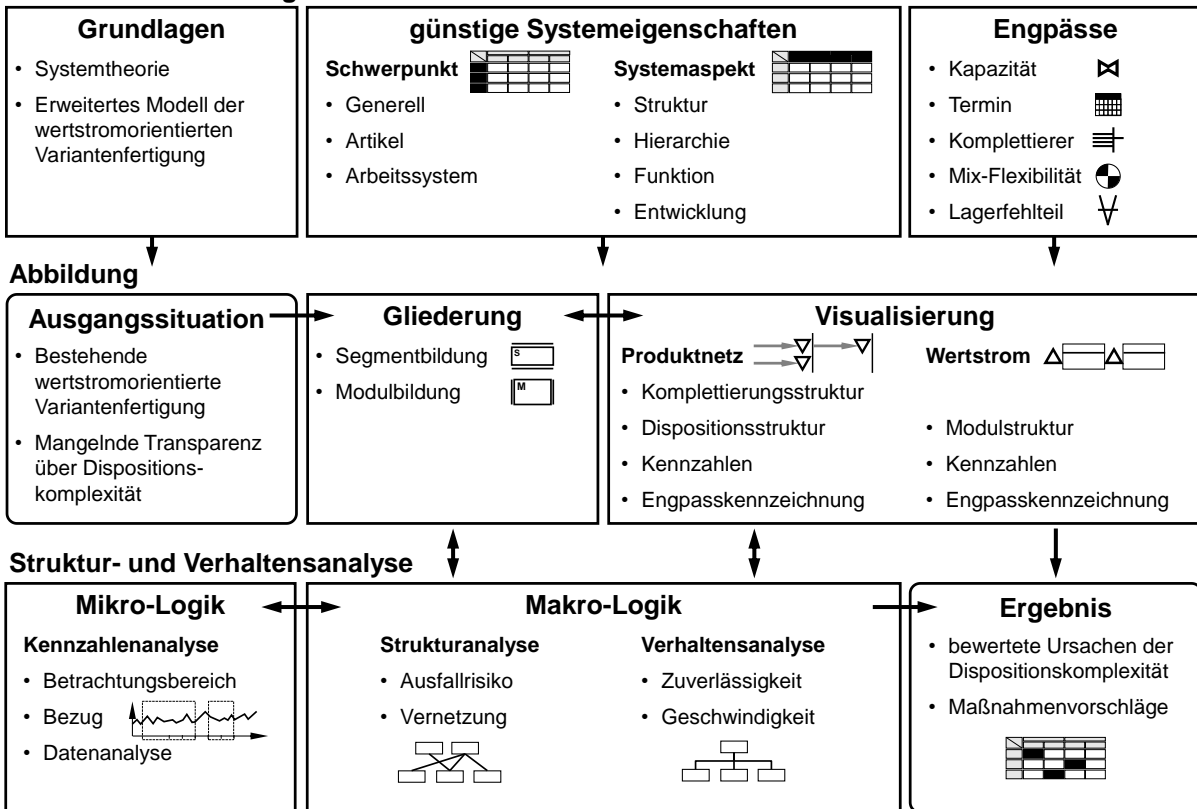
# 5 Methode zur Analyse der Dispositionskomplexität

Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen stellt das Kapitel die Methode zur Analyse der Dispositionskomplexität in der wertstromorientierten Variantenfertigung vor. Der im ersten Abschnitt vorgestellte Lösungsansatz basiert auf einem soll-zustandsorientierten Analyseverfahren. Um gegen einen solchen Soll-Zustand analysieren zu können, synthetisiert der zweite Abschnitt aus bestehenden Ansätzen zur Systemgestaltung einen Prüfkatalog günstiger Systemeigenschaften. Um in einem umfangreichen System zielgerichtet einzelne Elemente priorisieren zu können, führt der letzte Abschnitt fünf Engpassarten ein.

## 5.1 Lösungsansatz

Ziel der Arbeit ist die Identifikation von Ursachen geringer logistischer Zielerfüllung mit Hilfe der Komplexitätstheorie. Bild 5.1 beschreibt den Lösungsansatz im Überblick.

**Theoretische Grundlagen**



**Bild 5.1** Lösungsansatz zur Analyse der Dispositionscomplexität

Zunächst gilt es, die *theoretischen Grundlagen* darzustellen und geeignet zu erweitern. Die bereits dargestellten *Grundlagen* der Modellierung des Ist-Zustands bilden die Systemtheorie sowie das erweiterte Modell der wertstromorientierten Variantenfertigung. Um eine soll-zustandsorientierte Analyse durchführen zu können, gilt es, *günstige Systemeigenschaften* eines solchen Systems zu synthetisieren. Grundlage dafür sind existierende Gestaltungsrichtlinien und Heuristiken (Abs. 5.2). Die Priorisierung innerhalb eines umfangreichen Systems mit einer Vielzahl an Elementen erfolgt über die Ermittlung von *Engpässen*, um periodenbezogen diejenigen Elemente mit der größten Auswirkung auf die Zielerreichung zu identifizieren. Die unterschiedlichen Engpassarten werden in Anlehnung an die zentralen Klassen des Systems definiert (Abs. 5.3).

Aufbauend auf theoretischen Grundlagen erfolgt die *Abbildung* der wertstromorientierten Variantenfertigung. *Ausgangssituation* der Analyse ist die bestehende wertstromorientierte Variantenfertigung mit fehlender Transparenz über die Ursachen der Disposi-

tionskomplexität. Ziel der *Gliederung* ist es, das System in möglichst unabhängig analysierbare Subsysteme aufzuteilen. Dazu wird das System in Segmente und Module unterteilt. (Abs. 5.4). Die *Visualisierung* der Ergebnisse erfolgt in zwei zueinander in Beziehung stehenden Darstellungen (Abs. 5.5):

- Das *Produktnetz* stellt eine Produktfamilie mit ihren zentralen Komponentenfamilien und den Komplettierungsbedingungen dar und ist an das auftragsbezogene Durchlaufdiagramm angelehnt. Über Kennzahlen zur Beschreibung von Struktur und Verhalten sind Abweichungen quantifiziert dargestellt und erklärbar.
- Der *Wertstrom* ist an die Wertstromdarstellung angelehnt. Er zeigt die Materialflüsse und Verhalten der einzelnen Arbeitssysteme sowie deren Vernetzung detailliert. Dadurch lassen sich konkrete Ursachen der Dispositionskomplexität identifizieren.

Aufbauend auf den Visualisierungen erfolgt die iterative *Struktur- und Verhaltensanalyse*. Diese *Makro-Logik* der Analyse ist in zwei Schritte unterteilt:

- Schwerpunkt der *Strukturanalyse* ist die Untersuchung der Arbeitssysteme. Die Analyse des Ausfallrisikos ermittelt kritische Arbeitssysteme. Die Untersuchung der Vernetzung zeigt die Unabhängigkeit der einzelnen Segmente und Module aus Ressourcensicht (Abs. 6.2).
- Die *Verhaltensanalyse* orientiert sich an den Dimensionen der Logistikleistung. Über Prüfbäume werden die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge für die beiden Dimensionen Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit sowohl für die externe Kundensicht als auch für die interne Dispositionssicht abgebildet (Abs. 6.3 und 6.4). Die Messung der Zielerreichung erfolgt über Kennzahlen.

Die Kennzahlenanalyse als *Mikro-Logik* beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung der Kennzahlen. Aufgrund des heuristischen Vorgehens ist die Datenanalyse einerseits aufwandsarm durchführbar. Andererseits kann über die Iterationen, sofern notwendig, der gesamte Betrachtungsbereich vollständig und systematisch geprüft werden. (Abs. 6.5)

*Ergebnis* der Analyse sind konsolidierte Ursachen der Dispositionskomplexität, anhand derer sich Handlungsempfehlungen zur Verbesserung ableiten lassen. Die Zusammenfassung der Ursachen erfolgt angelehnt an die günstigen Systemeigenschaften. (Abs. 6.6)

Das vorgestellte Vorgehen folgt den vier charakteristischen Betrachtungsweisen der Situationsanalyse des Systems Engineering. Die Modellierung basiert auf der systemorientierten Betrachtung. Die Verhaltensanalyse ist ursachenorientiert (diagnostisch) aufgebaut. Anhand der günstigen Systemeigenschaften und identifizierten Engpässe lassen sich lösungsorientiert (therapeutisch) Veränderungen ableiten. Aus dem Zusammenwirken der drei genannten Betrachtungsweisen sowie der Mikro-Logik lässt sich die zukunfts- bzw. zeitorientierte Betrachtungsweise ableiten. (Haberfellner et al. 2015, S. 73–74)

## 5.2 Günstige Systemeigenschaften wertstromorientierter Variantenfertiger

Das soll-zustandsorientierte Analysevorgehen lehnt sich an Heuristiken, die günstige Systemeigenschaften beschreiben, an. *Günstige Systemeigenschaften* für wertstromorientierte Variantenfertiger sind heuristische formulierte Systemcharakteristika, die auf theoretischen oder empirischen Erkenntnissen aufbauen und die logistische Zielerreichung in der Regel positiv beeinflussen. Ziel ist es, anhand der günstigen Systemeigenschaften und trotz unvollständiger Gestaltung des Systems eine systematische und nachvollziehbare soll-zustandsorientierte Analyse durchführen zu können.

Bestehende Ansätze umfassen eine Vielzahl an teils redundanten Gestaltungsaspekten. Für den Einsatz innerhalb eines Analysevorgehens ist daher die Reduzierung auf eine handhabbare Anzahl klar voneinander abgegrenzter Eigenschaften notwendig. Um die Abweichungen des untersuchten Systems von den günstigen Systemeigenschaften priorisieren zu können, muss eine Eigenschaft hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades bewertbar sein.

Der erste Abschnitt zeigt zunächst bestehende Heuristiken und Gestaltungsansätze. Darauf aufbauend folgt anschließend die Synthese der günstigen Systemeigenschaften.

### **5.2.1 Zusammenfassung bestehender Ansätze und Fehlerkreise**

Schwerpunkt der Zusammenfassung bilden Heuristiken und Lösungsstrategien auf Ebene der Gestaltungsrichtlinien. Gestaltungsrichtlinien sind einerseits spezifisch genug, um konkrete Abweichungen identifizieren zu können. Andererseits sind sie abstrakt genug, um sie auf eine Vielzahl an Situationen anwenden zu können. Neben den Lösungsstrategien werden bekannte Fehlerkreise innerhalb der Disposition vorgestellt. Werden Fehlerkreise nicht berücksichtigt, kann dies gegebenenfalls kurzfristig zu einer Verbesserung der logistischen Zielerreichung führen. Langfristig besitzen sie in der Regel jedoch eine pathologische Wirkung. (vgl. Abs. 2.2.3)

Die folgende knappe Zusammenfassung der Ansätze und Fehlerkreise ist angelehnt an die Aspekte eines Systems und nach struktur- und verhaltensorientierten Ansätzen gegliedert (vgl. Bild 2.11). Neben grundlegenden system- und komplexitätstheoretischen Ansätzen existiert eine Vielzahl an Ansätzen mit Produkt- bzw. Produktionsschwerpunkt. Eine ausführlichere Beschreibung der Ansätze zeigt Anhang A.1.

#### ***Strukturorientierte Ansätze und Fehlerkreise***

Produktorientierte Gestaltungsansätze zielen mehrheitlich auf die geeignete Gestaltung der Vielfalt ab. Da der Markt jedoch selbst ein komplexes adaptives System ist, lässt sich die Wirkung der Gestaltungsansätze oft nur schwer vorhersehen. Die Reduzierung der Kompliziertheit, welche als Teilbereich der Komplexität verstanden wird, ist Schwerpunkt der Ansätze (Bauernhansl et al. 2014, S. 2). Bezogen auf das Produktprogramm besteht das größte Potenzial zur Kostenreduzierung im Vermeiden der Komplexität durch geeignete Konstruktion. Geringere Potenziale bieten die Reduzierung bestehender Komplexität oder Maßnahmen zur Komplexitätsbeherrschung. (Schuh et al. 2017a, S. 226, vgl. Bohne 1998, S. 84–86, Schuh 1989, S. 127)

Eine hohe Variantenvielfalt kann einerseits einen Wettbewerbsvorteil darstellen. Andererseits birgt die Vielfalt oft auch ein Kostennachteil. Im Rahmen einer gewählten Strategie kann es sinnvoll sein, die belieferten Kunden und das Produktprogramm anzupassen. Die Anpassung sollte auf einer Synthese aus der Wettbewerbspositionierung (Outside-In) und dem Kernkompetenzansatz (Inside-Out) basieren. (Schuh et al. 2017a, S. 47, 74)

Die ideal gestaltete variantengerechte Produktfamilie weist vier grundlegende Eigenschaften auf (Kipp 2012, S. 64; Krause et al. 2018, S. 118–120):

- Erstens differenziert sie Komponenten in Standard- und Variantenkomponenten. Standardkomponenten werden häufig und unverändert in den Produkten eingesetzt.
- Zweitens werden Variantenkomponenten soweit reduziert, dass sie lediglich die für das jeweilige Unterscheidungsmerkmal relevanten Elemente beinhalten. So lassen sie sich kostengünstig produzieren.
- Drittens sind den Variantenkomponenten eins-zu-eins die differenzierenden Produktmerkmale zugeordnet. Eine Variantenkomponente besitzt genau eine Funktion.
- Viertens sind die Komponenten voneinander entkoppelt. Über standardisierte Schnittstellen lassen sich unterschiedliche Komponenten zusammenfügen und unabhängig voneinander verändern.

Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass eine geeignete Strukturierung von Produkt und Produktion idealerweise ganzheitlich erfolgt und dadurch eine gezielte Variantenteilung in dafür vorgesehenen flexiblen Modulen ermöglicht. Zwei Fehlerkreise zeigen die Auswirkungen ungünstiger Systemstrukturierungen.

Der Fehlerkreis der Variantenvielfalt konzentriert sich auf das Produktprogramm. Schwerpunkt des Fehlerkreises der auftragsbezogenen Steuerung ist die Auswahl der zu überwachenden Systemobjekte.

**Fehlerkreis der Variantenvielfalt:** Die Auswirkungen der Variantenvielfalt auf die Produktion werden von zahlreichen Autoren untersucht (vgl. Rathnow 1993; Wildemann 2013; Schuh et al. 2017a). Ein stagnierender Absatz in den Volumenmärkten erhöht den Druck, Nischenmärkte mit zusätzlichen Produktvarianten zu bedienen. Werden die durch die Vielfalt erzeugten Kosten nicht verursachergerecht zugeordnet, führt dies zu einer Preiserhöhung für das gesamte Sortiment inklusive der Standardprodukte. Eine solche Preiserhöhungen führen häufig zu weiter sinkenden Absätzen. (Schuh et al. 2017a, S. 21–22)

Sinnvoller als die Erweiterung des Produktprogramms können die Bereinigung sowie die Weiterentwicklung des Produktprogramms sein, um die innere Komplexität an die vom Markt geforderte äußere Komplexität anzupassen (Mühlenbruch 2004, S. 46; Riedel et al. 1999, S. 30–31, vgl. Malik 1996, S. 191–198; Warnecke 1992, S. 104; Schuh et al. 2017a, S. 23–24). Prägnant lässt sich festhalten: „Das Ziel vieler Unternehmen sollte es sein, in ihren Produktprogrammen bei gleichem Umsatz weitaus weniger Produktvarianten und vergleichsweise vor allem weniger C-Produkte (umsatzschwache Produkte bzgl. Stückzahl, sog. Exoten) zu führen“. (Schuh et al. 2017a, S. 30)

**Fehlerkreis der auftragsbezogenen Steuerung:** Grundlegend beschreibt Wiendahl (2011, S. 402–403) den Fehlerkreis. Die Ausgangssituation bilden Bedarfsspitzen und Eilaufträge. Um möglichen Verspätungen entgegenzuwirken, steuern Mitarbeiter die Aufträge „von Hand“ ohne die entsprechenden Pläne im System zu aktualisieren. Diese Eingriffe haben ein geringes Vertrauen in die Pläne zur Folge. Zudem sinkt die Zuverlässigkeit der mittelwertbasierten Planungslogik. Beides erhöht den Anteil an manuellen Eingriffen weiter. Anstatt einzelne Aufträge zu steuern, sollte sich die Produktionssteuerung auf die systematische Rückstands- und Kapazitätsregelung konzentrieren. Der Schwerpunkt der Systemanalyse sowie der folgenden Systemeingriffe sollte arbeitssystembezogen erfolgen. (Wiendahl 2011, S. 402–403, 12; Erlach 2020, S. 177)

### ***Verhaltensorientierte Ansätze und Fehlerkreise***

Verhaltensorientierte Ansätze zielen auf die Erhöhung der Zuverlässigkeit des Verhaltens ab. Eine hohe Zuverlässigkeit reduziert die Notwendigkeit korrigierender Steuereingriffe und wirkt positiv auf die logistischen Ziele. Insbesondere in einem turbulenten Umfeld gilt es, das System so zu gestalten, dass durch geeignete Anpassungsfähigkeit eine zuverlässige und gleichzeitig wirtschaftliche logistische Leistung angeboten werden kann. Einem solchen zuverlässigen Systemverhalten wirken insbesondere drei bekannte Fehlerkreise entgegen:

**Fehlerkreis der Kapazitätsplanung:** Dem Fehlerkreis zugrunde liegt der Bullwhip- oder Peitscheneffekt (Forrester 1958; Lee et al. 1997a, 1997b). Der insbesondere in langen Lieferketten auftretende Effekt hat negative Auswirkungen auf die Auslastung und führt

zu Bestandsschwankungen sowie Bestandsaufbau. Der Effekt entwickelt sich zum Fehlerkreis der Kapazitätsplanung, wenn unmittelbar auf lokale und temporäre Lieferengpässe reagiert wird. Folgen sind gering ausgelastete Kapazitäten, hohe Bestandsschwankungen sowie ein Bestandsaufbau. Lödding schlägt acht Maßnahmen zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts vor, dazu zählen unter anderem die Reduzierung der Informationslaufzeiten, kleine Losgrößen sowie eine träge Prognosemethode. (Lödding 2016, S. 139–140, 150)

**Fehlerkreis der Fertigungssteuerung:** Grundlegend beschrieben und untersucht wird der Effekt von Mather et al. (1978) (vgl. Wiendahl 1987). Eine theoretisch mögliche Maßnahme zur Erhöhung der Termintreue von Produktionsaufträgen ist die Erhöhung der Soll-Durchlaufzeiten, aber damit auch, über die frühere Auftragsfreigabe, der Umlaufbestände. Die durch die höheren Bestände in der Praxis häufiger auftretenden Reihenfolgevertauschungen verringern die Termintreue jedoch. Zur Erhöhung der Termintreue besser geeignet ist die Stabilisierung und Reduzierung der Durchlaufzeiten bzw. eine Reduzierung des Rückstands. (Wiendahl 2002, S. 225; Erlach 2020, S. 16)

**Fehlerkreis der Sicherheitsbestandsanpassung:** Die Beschreibung des Fehlerkreises geht auf die Arbeit von Holstein (1968) zurück. Eine Ursache für eine hohe Terminabweichung ist hoher Rückstand. Um der daraus folgenden Terminabweichung entgegenzuwirken, werden die Sicherheitsbestände erhöht. Dies kann zu früher freigegebenen Nachfertigungsaufträgen führen, welche jedoch den Rückstand erhöhen. Um Terminabweichungen aufgrund von Rückstand zu reduzieren, ist eine gezielte Rückstandsregelung, z.B. über Kapazitätserhöhungen an überlasteten Arbeitssystemen besser geeignet. (Lödding 2016, S. 195–197)

**Fazit:** Die bestehenden Heuristiken und Lösungsansätze sowie die bekannten Fehlerkreise sind geeignet, um darauf aufbauend ein System zu gestalten. Aufgrund der Redundanz sowie der teils fehlenden Überprüfbarkeit des Erfüllungsgrades sind sie in der aktuellen Form jedoch nicht ausreichend, um ein bestehendes System systematisch zu untersuchen.

### 5.2.2 Synthese günstiger Systemeigenschaften

Ziel der Synthese ist es, die bestehenden Ansätze zu einem Set an überprüfbaren günstigen Eigenschaften zusammenzufassen. Wertstromorientierte Variantenfertigungen, die



diese günstigen Eigenschaften besitzen, erzielen im Regelfall eine hohe logistische Zielerreichung bei geringer Dispositionskomplexität. Abhängig von der spezifischen Situation kann die graduelle Erfüllung einer günstigen Systemeigenschaft notwendig oder sinnvoll sein.

Die entwickelten günstigen Eigenschaften besitzen im Gegensatz zu Gestaltungsrichtlinien nicht den Anspruch, ein System gestalten zu können. Vielmehr unterstützen sie die systematische Durchführung der Analyse der Dispositionskomplexität und die Bewertung des Systemzustands.

Aspekt Bereich	Systemstruktur		Systemverhalten	
	Struktureller Aspekt	Hierarchischer Aspekt	Funktionaler Aspekt	Entwicklungsbezogener Aspekt
<b>Generell</b>	Geringe Objektvielfalt	Lose Kopplung	Zuverlässige Funktion	Kontinuierliche Entwicklung
<b>Artikel</b>	Geringe Variantenanzahl	Gezielte Variantenentstehung	Hohe Qualität	Produktionsgerechte Komponentenentwicklung
<b>Arbeitssystem</b>	Flexible Auftragsreihenfolge	Klare Zuordnung	Flexible Leistungserbringung	Kontinuierliche Verbesserung

**Bild 5.2** Günstige Eigenschaften wertstromorientierter Variantenfertigungen

Die Synthese der günstigen Eigenschaften orientiert sich an den vier Aspekten eines Systems (vgl. Bild 2.6). Wie in Bild 5.2 dargestellt, werden drei Bereiche unterschieden:

- Die *generellen Eigenschaften* sind abstrakt formuliert und besitzen einen großen, allgemeingültigen Geltungsbereich. Sie basieren mehrheitlich auf den Theorien zur Gestaltung und Lenkung komplexer Systeme.
- Die *artikelbezogenen Eigenschaften* beschreiben die günstigen Eigenschaften der Artikel in einer wertstromorientierten Variantenfertigung genauer. Grundlage dafür sind insbesondere die Ansätze der variantenreichen Produktgestaltung.

- Die *arbeitssystembezogenen Eigenschaften* beschreiben günstige Strukturen sowie ein günstiges Verhalten der Arbeitssysteme. Grundlage dafür sind insbesondere die wertstromorientierten Gestaltungsansätze.

Die Entwicklung auftragsbezogener Eigenschaften erscheint für die wertstromorientierte Variantenfertigung nicht notwendig. Begründen lässt sich dies insbesondere durch deren charakteristische Merkmale (vgl. Bild 2.3):

- Ausgangsbasis der wertstromorientierten Variantenfertigung sind Serienprodukte. Die Auftragsnetze einzelner Produkte und Produktfamilien sind in der Regel ähnlich. Sie lassen sich über die Artikelstruktur hinreichend genau abbilden. Eine explizite Abbildung einzelner Kundenaufträge erscheint überflüssig.
- Eilaufträge und Turbulenzen durch geänderte Kunden- und Produktionsaufträge stellen Ausnahmen dar. Die Unterscheidung von Eil- und Normalaufträgen tritt damit in den Hintergrund.

Bild 5.2 zeigt die Synthese der zwölf günstigen Systemeigenschaften. Für jede Eigenschaft erfolgt zunächst die Darstellung der im Allgemeinen gültigen, günstigen Eigenschaft. Anschließend werden Ausnahmefälle dargestellt. Abhängig von der spezifischen Situation kann es notwendig und sinnvoll sein, von den günstigen Eigenschaften abzuweichen oder Einschränkungen zu treffen. Den Abschluss bildet eine knappe Zusammenfassung der jeweiligen günstigen Eigenschaften und der relevanten Einschränkungen.

### **Generelle Eigenschaften**

**Geringe Objektvielfalt:** Systeme mit wenigen unterschiedlichen Elementen bilden einfachere und damit handhabbarere Strukturen. Einfachheit entsteht durch Identität und Ähnlichkeit von Objekten und Subsystemen. Elemente mit identischer Struktur verhalten sich in der Regel identisch und erleichtern somit die Systemhandhabung. Zur Erzeugung ähnlicher Elemente bedarf es häufig nur geringer Anpassungen, beispielsweise bei der Produktion von Baureihen. Gänzlich unterschiedliche Objekte hingegen müssen von der Lenkungs- und Ausführungsinstanz zuerst einmal verstanden werden und weisen zudem häufig ein unterschiedliches Verhalten auf. So ist beispielsweise das Verhalten chemischer Prozesse ein ganz anderes als das der Prozesse in der spanenden Bearbeitung. (vgl. Kipp

et al. 2008, S. 428–431; Jäger et al. 2014, S. 649; Schuh et al. 2017a, S. 228; Mühlenbruch 2004, S. 46–48; Warnecke 1992, S. 144–147)

Eine gegenüber dem Umsystem Markt zu geringe Systemvielfalt kann zu einem Unterangebot und damit einer unzureichenden Ausschöpfung der Economies of Scope führen. Werden beispielsweise individuelle Beschriftungen des Produkts angeboten, kann dies einerseits die Produktvielfalt und die logistischen Anforderungen erhöhen. Andererseits können aufgrund der Individualisierung bei geeigneter Systemkonfiguration auch höhere Deckungsbeiträge erwartet werden.

► Das System sollte die geforderten Funktionen mit einer möglichst geringen Anzahl an Elementen und Verbindungen erfüllen. Die geringe Anzahl sollte die Vielfalt nicht unzulässig einschränken.

**Lose Kopplung:** Je stärker einzelne Subsysteme voneinander entkoppelt sind, desto unabhängiger können diese gesteuert werden. In modular aufgebauten Systemen sind die einzelnen Subsysteme nur lose miteinander gekoppelt, sodass die Intensität der Verbindungen innerhalb eines Subsystems deutlich höher ist als zwischen den Subsystemen. Eine solche lose Kopplung verringert die Risiken struktureller Fehlerfortpflanzung und ermöglicht dennoch die Nutzung von Synergien. Beispiel ist die Verteilung der Verantwortung auf unterschiedliche, miteinander kommunizierende Abteilungen. (vgl. Axelrod et al. 2000, S. 157; Kelly 1997, S. 595; Bahill et al. 2008, S. 11; Mühlenbruch 2004, S. 47)

Durch die Entkopplung können Synergien verloren gehen, beispielsweise die Möglichkeit, vorhandene Kapazitäten zu teilen. Eine Sonderform der losen Kopplung ist der unabhängige Betrieb, bei dem Systeme ggf. redundant und unabhängig betrieben, aber verbunden werden können. Die Nutzung eines alternativen Arbeitssystems im Fall eines Maschinenausfalls in einem ansonsten getrennt betriebenen Produktionssegment ist ein Beispiel der losen Kopplung. Der Wissensaustausch als Teil des Informationsflusses zwischen den unabhängigen Systemen sollte unabhängig von der strukturellen Entkopplung der Materialflüsse stets möglich sein und gefördert werden. (vgl. Axelrod et al. 2000, S. 156)

► Die Subsysteme sollten möglichst lose gekoppelt sein. Die lose Kopplung sollte eine mögliche Kopplung nicht verhindern.

**Zuverlässige Funktion:** Subsysteme, die ihre Funktion zuverlässig erfüllen sind notwendig, um darauf aufbauend umfangreichere Systeme zu gestalten. Je stabiler die einzelnen Funktionen ablaufen, desto enger können die Subsysteme zeitlich gekoppelt werden und desto schneller können die Systemfunktionen ablaufen. So erfordert beispielsweise die schnelle Lieferung von individuell produzierten Ersatzteilen die zuverlässige und schnelle Funktion aller beteiligten Prozesse. (vgl. Simon 1962, S. 467–477; Malik 1996, S. 442; Axelrod et al. 2000, S. 157)

Je unzuverlässiger die Funktion einzelner Subsysteme, desto wichtiger wird die zeitliche Entkopplung dieser Subsysteme, um Schwankungen zu glätten sowie Ausfälle einzelner Objekte zu überbrücken. Beispielsweise können Puffer oder eine zusätzliche Qualitätsprüfung die unmittelbare Fehlerfortpflanzung verhindern. Die zeitliche Entkopplung aufgrund unzuverlässiger Funktion hat höhere Lieferzeiten und höhere Bestände zur Folge. Grundsätzlich macht die zeitliche Entkopplung das System träge und erschwert die Identifikation der Fehlerursachen. (vgl. Kelly 1997, S. 597; Erlach 2020, S. 155)

► Die einzelnen Subsysteme des Systems sollen ihre Funktion zuverlässig und schnell erfüllen. Eine zeitliche Entkopplung sollte bei unzuverlässiger Funktion eingesetzt werden.

**Kontinuierliche Entwicklung:** Eine kontinuierliche Entwicklung passt das System an die sich verändernde Umwelt an. Um die Wahrscheinlichkeit für den Fortbestand des Systems zu erhöhen, orientieren sich die Anpassungen an multiplen Zielen und wachsenden Grenzerträgen. Die Anpassungen führen häufig zu vorübergehend geringerer Zielerreichung, Fehlern und Turbulenzen im Ablauf. Ein iteratives, rückgekoppeltes Vorgehen minimiert das Risiko für große Schäden. Ein geringeres Risiko wiederum erhöht die Veränderungsbereitschaft. So werden beispielsweise im Rahmen von Pilotprojekten neue Technologien und Verfahren zunächst in gesonderten Bereichen untersucht. (vgl. Kelly 1997, S. 594–599; Bahill et al. 2008, S. 12; Schmidt 2019, S. 98; Ulrich et al. 1995, S. 89; Wildemann 1994, S. 276–277; Lödding 2016, S. 102–105; Warnecke 1992, S. 148–151)

Eine kontinuierliche Entwicklung und die Balance von Exploration und Exploitation ist notwendig, jedoch nicht hinreichend, um den langfristigen Fortbestand des Systems zu garantieren. Eine sich zu schnell verändernde Umwelt kann die Veränderungsfähigkeit des

Systems übersteigen. So können beispielsweise disruptive Nachfrageveränderungen aufgrund neuer Technologien oder unerwarteter Versorgungsengpässe die Veränderungsfähigkeit der Produktion übersteigen. (Stüttgen 2003, S. 335–336, vgl. March 1991, S. 71; Axelrod et al. 2000, S. 43–50)

► Das System soll sich, gemessen an mehrdimensionalen Zielen, kontinuierlich weiterentwickeln. Exploration und Exploitation sollten kontinuierlich gegeneinander abgewogen werden.

### **Artikelbezogene Eigenschaften**

**Geringe Variantenanzahl:** Je weniger Varianten produziert und gelagert werden müssen, desto einfacher kann das Produktionssystem gestaltet sein. Eine günstige Produktgestaltung ermöglicht die Konfiguration unterschiedlichster Produktvarianten aus einer geringen Anzahl möglichst standardisierter Komponenten. So können beispielsweise aus einer übersichtlichen Anzahl an Elektronikkomponenten eine Vielzahl unterschiedlicher PC-Varianten konfiguriert werden. (vgl. Vester 2000, S. 136, Schuh et al. 2017a, S. 228, Kipp et al. 2008, S. 428–431, Mühlenbruch 2004, S. 46–48, Eidenmüller 1995, S. 37–39)

Durch die geringere Variantenanzahl entsteht häufig eine Vernetzung ehemals unabhängiger Subsysteme. Diese Modularisierung der Produkte hat eine höhere Vernetzung der Artikel und der Aufträge zur Folge, welche jedoch für die Produktion in der Regel leichter handhabbar ist als die höhere Vielfalt der Komponenten. Allerdings können dadurch höhere Risiken für einen Gesamtausfall des Systems entstehen. So betrifft beispielsweise die Lieferverzögerung eines zentralen Moduls alle damit verbundenen Produkte. (vgl. Bar-Yam 2006, S. 35; Krause et al. 2018, S. 115–116)

► Die Erfüllung der vielfältigen Kundenwünsche sollte mit einer möglichst geringen Anzahl an Komponentenvarianten erfolgen. Die Risiken der Standardisierung und Vernetzung sind abzuwägen.

**Gezielte Variantenentstehung:** Eine im Produktionsprozess späte Variantenentstehung trägt in der Regel zu einem effizienten System bei. Idealerweise findet die Variantenentstehung in dedizierten, dafür ausgelegten Subsystemen statt. Die späte Variantenentstehung beeinflusst die logistische Zielerreichung positiv. Die zu Beginn der Produktion oft

notwendigen Ur- und Umformprozesse besitzen häufig, insbesondere im Vergleich zu später erfolgenden Montageprozessen, hohe Rüstzeiten und somit eine geringere Variantenfähigkeit. Je geringer die Vielfalt an solchen Artikeln mit langen Wiederbeschaffungs- und Durchlaufzeiten, desto eher lassen sich geringere Bestände bei gleichem Servicegrad realisieren. Beispielsweise können variantenreiche Produkte auf einer Plattform aufbauen, bei der die Varianz erst durch die Montage der jeweils gewünschten Module erfolgt. (vgl. Mühlenbruch 2004, S. 48; Bahill et al. 2008, S. 11; Krause et al. 2018, S. 118–119; Schuh et al. 2017a, S. 40; Haberfellner et al. 2015, S. 238; Wiendahl et al. 2004)

Je nach Produkt kann es günstiger sein, die Grundfunktion frühzeitig über architekturbestimmende Plattformen zu erzeugen, anstatt diese über mehrere Module zusammenzusetzen. Dadurch liegt die Variantenentstehung gezielt am Anfang der Herstellkette. Beispiele sind unterschiedliche aus einem Teil gefertigte Grundkonstruktionen, die bereits eine Vielzahl an Optionen beinhalten. (vgl. Krause et al. 2018; Schuh et al. 2013, S. 84)

► Artikelvarianten sollten so spät wie möglich im Produktionsablauf in dafür vorgesehenen Subsystemen entstehen. Die Bewertung der Variantenanzahl und Variantenentstehungspunkte sollte im Gesamtzusammenhang erfolgen.

**Hohe Qualität:** Eine hohe Qualität der gelieferten und produzierten Artikel mit dem Ziel „Null Fehler“ wirkt positiv auf die logistische Zielerreichung. Insbesondere bei bedarfsorientiert disponierten Komponenten können Ausschuss und Nacharbeit die Termintreue der Endprodukte verringern. So kann beispielsweise der Defekt einer auftragsbezogen bestellten Komponente mit langen Wiederbeschaffungszeiten die Auslieferung des Kundenauftrags gefährden. (vgl. Simon 1962, S. 469; Crosby 1980, S. 6–7; Erlach 2020, S. 27; Wildemann 1994, S. 278)

Prüfungen helfen dabei, fehlerhafte Artikel zu identifizieren. Nacharbeiten können die so identifizierten Fehler zum Teil noch korrigieren. Ziel ist es jedoch, durch stabile und geeignet gestaltete Prozesse, Qualität zu erzeugen, um auf möglich Prüf- und Nacharbeitsprozesse verzichten zu können. So kann beispielsweise die an einen Prozess anschließende Elektronikprüfung zwar einen Fehler detektieren, die anschließende Nacharbeit benötigt dennoch weitere Ressourcen. (vgl. Liker et al. 2006, S. 184–185; Erlach 2020, S. 27)

► Artikel sollten möglichst fehlerfrei beschafft, weiterverarbeitet und an den Kunden geliefert werden. Qualität sollte ohne zusätzliche Prüfung erzeugt werden.

**Produktionsgerechte Komponentenentwicklung:** Die systematische Weiterentwicklung und technische Anpassung bestehender Komponenten ist häufig Voraussetzung für erhebliche Veränderungen an den durchzuführenden Herstellprozessen. Diese Veränderungen wiederum ermöglichen oft eine deutliche Verbesserung der logistischen Leistung. So reduziert beispielsweise die Anpassung des verwendeten Beschichtungssystems die notwendigen Aushärtezeiten. Dies ermöglicht geringere Pufferbestände und kürzere Durchlaufzeiten. (vgl. Schuh et al. 2017a, S. 228; Schuh et al. 2017a, S. 22; Malik 1996, S. 433–434)

Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Komponenteneigenschaften, Produktprogramm und Kundenanforderungen erzeugen Änderungen an Komponenten teilweise erhebliche Aufwände. Die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit neuer Prozesse ist zudem anfangs häufig starken Schwankungen unterworfen. Beides kann zumindest kurzfristig negativ auf die logistische Zielerreichung wirken. Daher sollten grundlegende Änderungen zunächst in kleinem Umfang geprüft werden (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 348; Thommen et al. 2017, S. 86; Corsten et al. 2009, S. 220–222)

► Komponenten sollten produktionsgerecht entwickelt und an den Stand der Produktionstechnik angepasst werden. Die Entwicklung sollte iterativ erfolgen.

### ***Arbeitssystembezogene Eigenschaften***

**Flexible Auftragsreihenfolge:** Arbeitssysteme ohne Reihenfolgerestriktionen können Aufträge in beliebiger Reihenfolge bearbeiten. Die flexible Auftragsreihenfolge unterstützt die Einhaltung der FIFO-Reihenfolge für die gesamte Herstellkette. Dies unterstützt kurze und stabile Durchlaufzeiten. Ist eine flexible Auftragsreihenfolge nicht oder nur mit sehr hohen Aufwänden, z.B. in Form zusätzlicher Rüstvorgänge, bearbeitbar, sind zusätzliche Puffer oder aufwändige Reihenfolgeplanungen notwendig. In einer vollständig variantenflexiblen Montage können beispielsweise die Puffer zur Neusequenzierung der Aufträge entfallen und Losgrößen reduziert werden. (vgl. Lödding 2016, S. 103; Erlach 2020, S. 262; Nyhuis et al. 2012, S. 141–143; Wildemann 1994, S. 271)

Eine hohe Reihenfolgeflexibilität erfordert häufig zusätzliche Investitionen und hat wirtschaftliche und technische Grenzen. Ist eine vollständig flexible Bearbeitungsreihenfolge wirtschaftlich nicht sinnvoll, sollte das System so gestaltet sein, dass die Einhaltung einer FIFO-Reihenfolge oder zumindest eine Kampagnenbildung möglich sind. Innerhalb einer Kampagne sollte der Rüstaufwand für einen Auftragswechsel gering sein. Der Wechsel zwischen zwei Kampagnen kann einen höheren Rüstaufwand erfordern. Über einstellbare Vorrichtungen können beispielsweise unterschiedliche Materialdurchmesser innerhalb eines Durchmesserbereichs automatisch mit geringem Aufwand gerüstet werden. Eine Veränderung des Durchmesserbereichs erfordert hingegen einen aufwändigeren Wechsel der Vorrichtung. (vgl. Erlach 2020, S. 247–249)

► Arbeitssysteme sollten in der Lage sein, Aufträge in flexibler Reihenfolge zu bearbeiten. Die Reihenfolgeflexibilität hat technische und wirtschaftliche Grenzen und sollte für die Arbeitssysteme einer Herstellkette ganzheitlich betrachtet werden.

**Klare Zuordnung:** Je eindeutiger sich Arbeitssysteme in einer einfachen Hierarchie ordnen lassen, desto einfacher lässt sich die physische Fabrikstruktur abbilden. Eine günstige Zuordnung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Vernetzung der Arbeitssysteme innerhalb eines Subsystems höher ist als zwischen zwei Subsystemen. Lassen sich Arbeitssysteme beispielsweise einzelnen Produktfamilien zuordnen, kann die Fabrik anhand der Familien eindeutig strukturiert und gesteuert werden. (vgl. Simon 1962, S. 473–474; Erlach 2020, S. 132–145; Schuh et al. 2013, S. 84–86)

Häufig lassen sich einzelne Arbeitssysteme nicht eindeutig in eine ansonsten geeignete Hierarchie einordnen. Eine Dopplung der jeweiligen Arbeitssysteme, um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen, ist in der Regel aus wirtschaftlichen (geringe Auslastung) oder technischen Gründen (Minimalkapazität) nicht sinnvoll. So könnte eine Lackieranlage zwar prinzipiell dupliziert werden, jedoch ist dies aufgrund der hohen Betriebskosten oft unwirtschaftlich. (vgl. Erlach 2020, S. 144)

► Arbeitssysteme sollten sich eindeutig in einer einfachen Hierarchie ordnen lassen. Die Ordnung sollte technische und wirtschaftliche Grenzen berücksichtigen.



**Flexible Leistungserbringung:** Lässt sich die Systemkapazität während der Planung zeitnah mit geringem Aufwand anpassen, unterstützt dies, insbesondere bei schwankender Kundennachfrage, die Einhaltung konstanter Lieferzeiten. Der Steuerung zur Verfügung stehende Kapazitätsflexibilität trägt insbesondere bei Abweichungen im kurzfristigen Kapazitätsangebot (z.B. Störungen) sowie der Kapazitätsnachfrage (z.B. Nacharbeit) zu geringem Rückstand bei. So kann über kurzfristige Mehrarbeit Rückstand bereits abgebaut werden, bevor dieser die Termintreue gefährdet. (vgl. Wiendahl 2011, S. 278–279; Lödding 2016, S. 103)

Das Vorhalten zusätzlicher Kapazitäten ist in der Regel mit Kosten verbunden. Insbesondere maximale Kapazitätsflexibilität ist wirtschaftlich häufig nicht sinnvoll. Zudem kann eine zu hohe Kapazitätsflexibilität beispielsweise den Bullwhip-Effekt fördern. Vor dem Einsatz zusätzlicher Flexibilität sollte daher geprüft werden, ob durch die Erhöhung der Zuverlässigkeit gleiche logistische Effekte erreicht werden können. (vgl. Schmidt 2019, S. 95; Malik 1996, S. 442; Lödding 2016, S. 149)

► Arbeitssysteme sollten eine geeignete Kapazitätsflexibilität aufweisen. Die Erhöhung der Zuverlässigkeit sollte vor Erhöhung der Kapazitätsflexibilität geprüft werden.

**Kontinuierliche Verbesserung:** Eine kontinuierliche Verbesserung kritischer Parameter der Arbeitssysteme zielt auf eine höhere logistische Zielerreichung ab. So können kürzere Rüstzeiten einerseits zu einer Erhöhung der Auslastung beitragen. Andererseits ermöglichen sie die Reduzierung der Losgröße bei gleichem Rüstanteil und damit eine Reduzierung der Durchlaufzeit. Durch die Erhöhung der Zuverlässigkeit lassen sich beispielsweise die Pufferbestände und damit wiederum die Durchlaufzeiten reduzieren. (vgl. Shirose 1992, Nakajima 1988, Koch 2008; Focke et al. 2018)

Bei der Durchführung der Verbesserungen sollten bekannte Wirkzusammenhänge und Fehlerkreise berücksichtigt werden, um Veränderungen zu vermeiden, die den Systemzustand langfristig verschlechtern. Beispielsweise hat die Maximierung der Auslastung durch höhere Pufferbestände eine überproportionale Verlängerung der Durchlaufzeiten zur Folge.

► Die logistische Zielerreichung der Arbeitssysteme sollte kontinuierlich verbessert werden. Die angestrebten Verbesserungen sollten bestehende Wirkzusammenhänge und Fehlerkreise berücksichtigen.

Die entwickelten günstigen Systemeigenschaften unterstützen bei der systematischen Analyse der wertstromorientierten Variantenfertigung. Über die im nächsten Abschnitt beschriebenen Engpässe lassen sich die Analyseergebnisse priorisieren.

### 5.3 Relevante dispositive Engpassarten

Um eine hohe Gesamtsystemleistung zu erzielen, ist es erfolgskritisch, die Engpässe des Systems zu kennen und zielgerichtet aufzulösen oder zu reduzieren. Generell erleichtert eine geringe Anzahl an Engpässen mit hoher Zuverlässigkeit den Systembetrieb. Der Einfluss der Komplexität des Systems auf die Engpässe ist schwer exakt zu bestimmen (Beer 2015, S. 77). Je eindeutiger die Engpässe allerdings bestimmbar sind, desto zielgerichteter können die Systemverbesserungen vorgenommen werden. (Erlach 2020, S. 263; Lödding 2016, S. 104, vgl. Wiendahl 2002, S. 201–204)

Als Engpass eines Systems wird diejenige Beschränkung mit den höchsten Auswirkungen auf die logistische Zielerreichung bezeichnet. Bild 5.3 stellt die fünf in der Arbeit untersuchten Engpässe dar. Abhängig von der Dispositionsstrategie und damit vom zentralen Koordinationsattribut der Produktionssteuerung lassen sich die Engpässe unterteilen (Abs. 3.2.1):






1. Der aus Ressourcensicht ermittelte *Kapazitätsengpass* beschränkt den Durchsatz des Systems. Er ist für Steuerungssysteme sowohl mit Termin- als auch mit Mengensynchronisation relevant.

Steht die *Terminsynchronisation* im Vordergrund, sind zwei Engpässe aus Ressourcen- und Auftragsicht relevant:

2. Der aus Ressourcensicht ermittelte *Terminengpass* führt aufgrund der hohen Rückstandsreichweite in der Regel zu hohen Terminabweichungen.
3. Fehlende *Komplettierer* verhindern den Start und gefährden die Termintreue der nachfolgenden Komplettierungsaufträge. Sie werden aus Auftragsicht ermittelt.

Steht die Mengensynchronisation im Vordergrund, sind zwei Engpässe aus Ressourcen- und Artikelsicht relevant:

4. Der aus Ressourcensicht ermittelte *Mix-Flexibilitätsengpass* beschränkt die kleinsten wirtschaftlich herstellbare Losgrößen von Wiederholteilen.
5. Das aus Artikelsicht ermittelte *Lagerfehlteil* zeigt eine geringe Lagerverfügbarkeit und damit mögliche Versorgungsengpässe von Lagerteilen auf.

Symbol	Engpass	Beschreibung / Ermittlung	Sicht	Fokus
	Kapazitätsengpass	Arbeitssystem mit der höchsten Auslastung	Res.	T & M
	Terminengpass	Arbeitssystem mit der höchsten Rückstandsreichweite	Res.	T
	Komplettierer	Versorgungsauftrag mit der höchsten relativen Terminabweichung zum Komplettierungsauftrag	Auf.	T
	Mix-Flexibilitätsengpass	Arbeitssystem mit dem höchsten Rüstanteil in Bezug zur Lagerbestandsreichweite	Res.	M
	Lagerfehlteil	Artikel mit der höchsten Fehlbestandsreichweite	Art.	M

Art.: Artikel Auf.: Auftrag Res.: Ressource M: Mengensynchronisation T: Terminalsynchronisation

### Bild 5.3 Überblick über die untersuchten Engpassarten

Mit Hilfe der Symbole lassen sich die Engpässe visualisieren. Für die Analyse sind das zeitliche und örtliche Auftreten der Engpässe von besonderer Bedeutung:

- **Zeit:** Üblicherweise wandern Engpässe innerhalb eines komplexen Systems im Zeitverlauf. Daher erfolgen die nachfolgend vorgestellten Engpassanalysen periodenbezogen. Tritt ein Engpass an einer Stelle in mehreren Perioden auf, wird das Engpasssymbol um ein oder mehrere Ausrufezeichen (!) ergänzt. Die Anzahl der Ausrufezeichen entspricht der Anzahl Perioden. Insbesondere bei der Darstellung zahlreicher Perioden erhöht eine nicht lineare Skalierung der Anzahl der Ausrufezeichen (z.B. logarithmisch) die Übersichtlichkeit (Wiendahl 2002, S. 157–158).
- **Ort:** Aufgrund der losen Kopplung ist die Ermittlung der Engpässe auf Gesamtsystemebene häufig nicht zielführend. Beispielsweise sollten die Engpässe in einer streng segmentierten Produktion segmentbezogen ermittelt werden.

Die Analysen der Engpässe decken die drei in dieser Arbeit relevanten Dimensionen der Flexibilität ab (Abs. 2.2.3, Slack et al. 2013, S. 52):

- Lagerfehlteil und Kompletierer verhindern eine frühere Lieferung und schränken damit die *Lieferflexibilität* ein.
- Der Mix-Flexibilitätsengpass identifiziert das Arbeitssystem mit der geringsten Mix-Flexibilität hinsichtlich *Auftrags- und Produktmix*.
- Der Kapazitätsengpass kennzeichnet das Arbeitssystem mit der geringsten Restkapazität und damit der geringsten *Volumenflexibilität*. Über den Terminengpass lassen sich Volumen- und Lieferflexibilität miteinander in Bezug setzen: Hoher Rückstand aufgrund fehlender Kapazität ist eine häufige Ursache für Fehlteile und Kompletierer.

### 5.3.1 Kapazitätsengpass

Die Auflösung eines Kapazitätsengpasses erhöht die mögliche Gesamtleistung des Systems. Die Kenntnis des Kapazitätsengpasses ist daher von hoher Relevanz innerhalb der Produktion, um die Volumenflexibilität des Systems ableiten zu können. Das Arbeitssystem mit der höchsten Auslastung ist in dieser Arbeit als *Kapazitätsengpass* definiert (Ungern-Sternberg et al. 2021, S. 280).

Insbesondere bei hoher Nachfrage sind die Arbeitssysteme über längere Zeit ausgelastet. Um die Kapazitäten nicht zu überlasten, werden daher Aufträge in die Zukunft verschoben oder fremd vergeben. Die dadurch verursachte Lieferzeitverlängerung heißt Belastungsverschiebung. Sie hängt in der Regel vom Kapazitätsengpass innerhalb der Produktion ab. Eine generelle Erhöhung der Kapazität, um die Belastungsverschiebung in Zeiten hoher Nachfrage zu reduzieren, muss stets gegenüber der mittleren Auslastung abgewogen werden (Dilemma der langfristigen Kapazitätsplanung, vgl. Lödding 2016, S. 45).

Die Ermittlung der prozentualen Auslastung des Arbeitssystems erfolgt anhand der in Ungern-Sternberg et al. (2021) definierten Zustände und in Anlehnung an das Verfahren von Roser et al. (2001): Je geringer der Zeiteanteil, in dem ein Arbeitssystem nicht produziert, jedoch produzieren könnte, desto höher dessen Auslastung. Bild 5.4a zeigt die Berechnung der relativen und absoluten Auslastung:

- Die *relative Auslastung* bezieht die Auslastung auf das aktuelle angewandte Schichtsystem. Zur Berechnung der relativen Auslastung wird die Leerlaufzeit (TI, beispielsweise Warten auf Aufträge) der gesamt möglichen Zeit zur Leistungserbringung gegenübergestellt. Die Zeit zur Leistungserbringung bezieht sich auf die Gesamtzeit der Analyseperiode (T) abzüglich ausgeschlossener Zeiten (TNE, beispielsweise Nachschichtverbote).
- Die *absolute Auslastung* bezieht sich auf die gesamte Leerlaufzeit innerhalb einer Analyseperiode. Zur Berechnung der absoluten Auslastung werden zu den kurzfristigen Leerlaufzeiten (TI) die längerfristig verfügbaren, aber aktuell nicht beplanten Zeiten (TNU) addiert und der gesamt verfügbaren Zeit (T – TNE) gegenübergestellt. Zu den nicht beplanten Zeiten zählen beispielsweise nicht genutzte, jedoch mögliche, Zusatzschichten.

## a) Berechnung: Auslastung

Relative Auslastung	Absolute Auslastung
$1 - \frac{TI}{T - TNE}$	$1 - \frac{TI + TNU}{T - TNE}$

mit

T	Gesamtzeit der Analyseperiode
TNE	Ausgeschlossene Zeit
TNU	Nicht geplante Zeit
TI	Leerlaufzeit
A	Auslastung

⊗	Relativer Kapazitätsengpass in einer Periode
⊠	Absoluter Kapazitätsengpass in einer Periode

## b) Beispiel

Parameter	Arbeitssystem		
	A	B	C
T	168 h	168 h	168 h
TNE	28 h	56 h	28 h
TNU	84 h	70 h	56 h
TI	7 h	28 h	14 h
A <sub>Relativ</sub>	95%	75%	90%
A <sub>Absolut</sub>	35%	13%	50%

**Bild 5.4** Ermittlung des Kapazitätsengpasses (nach Ungern-Sternberg et al. 2021)

Je exakter die Zeiten gemessen werden, desto genauer lassen sich die Engpässe bestimmen. Insbesondere um kurze Unterbrechungen wie beispielsweise Mikro-Störungen exakt zu ermitteln, ist die automatisierte digitale Erfassung der Arbeitssystemzustände sinnvoll (Maschinendatenerfassung).

Die Ermittlung der absoluten und relativen Engpässe sollte zunächst für das Gesamtsystem und anschließend für jedes Produktionsmodul erfolgen. Insbesondere in turbulenten Systemen sollte die Analyseperiode tendenziell kürzer gewählt werden, um sich verschiebende Engpässe erkennen zu können. Dargestellt wird der Kapazitätsengpass durch eine symbolisierte Engstelle (Bild 5.4b).

### 5.3.2 Terminengpass

Rückstand hat eine hohe Auswirkung auf die Termintreue. Eine gezielte Regelung des Rückstands an Arbeitssystemen ist daher geeignet, um die Termintreue zu erhöhen (Abs. 3.3.3). Das Arbeitssystem mit der höchsten Arbeitsrückstandsreichweite wird als *Terminengpass* bezeichnet.

Bild 5.5a zeigt die Ermittlung des direkten und des indirekten Terminengpasses anhand der Reichweite des Arbeitsrückstands:

- Die direkte Rückstandsreichweite entspricht der Summe des rückständigen bearbeitbaren Direktbestands am Arbeitssystem im Verhältnis zur mittleren Leistung des Arbeitssystems. Sie lässt sich durch gezielte Maßnahmen direkt am jeweiligen Arbeitssystem, beispielsweise Kapazitätserhöhung, beeinflussen.
- Die indirekte Rückstandsreichweite entspricht der Summe des Gesamtrückstands des Arbeitssystems im Verhältnis zur mittleren Leistung des Arbeitssystems. Die Ursachen für indirekten Arbeitsrückstand liegen nicht vollständig im Einflussbereich des betrachteten Arbeitssystems. Häufige Ursachen sind Rückstände an flussaufwärts liegenden Arbeitssystemen (Vorgänger).

**a) Berechnung: Rückstandsreichweite**

direkt	indirekt
$RRW = \frac{R_{BDB}}{L}$	$RRW = \frac{R_{Gesamt}}{L}$

mit

 $R_{BDB}$  Bearbeitbarer Direktbestand im Rückstand [ZE] $R_{Gesamt}$  Gesamtrückstand [ZE]

L Mittlere Leistung [ZE/ZE]

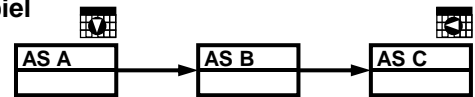
RRW Rückstandsreichweite [ZE]



Direkter Terminengpass in einer Periode



Indirekter Terminengpass in einer Periode

**b) Beispiel**

Parameter	Arbeitssystem		
	A	B	C
$R_{BDB}$	40 h	0 h	30 h
$R_{Gesamt}$	40 h	50 h	70 h
L	10 h/d	10 h/d	10 h/d
$RRW_{direkt}$	4 d	0 d	3 d
$RRW_{indirekt}$	4 d	5 d	7 d

**Bild 5.5** Ermittlung des Terminengpasses

Um den Arbeitsrückstand für jedes Arbeitssystem exakt bestimmen zu können, bedarf es präziser und realistischer Vorgabewerte für jeden Arbeitsgang eines Auftrags (Vorgabe- und Übergangszeiten). In der Praxis sind die Übergangszeiten zwischen einzelnen Arbeitssystemen jedoch häufig nicht korrekt gepflegt. Um realistische Aussagen zum Rückstand treffen zu können, sind vorab die Soll-Übergangszeiten zu prüfen.

Die Analyse sollte daher zunächst auf Auftragsebene beginnen. Zunächst wird das Produktionsmodul mit der höchsten Rückstandsreichweite (bezogen auf die mittlere Kapazität des jeweiligen Moduls) ermittelt. Für dieses Modul werden anschließend der direkte und indirekte Terminengpass identifiziert. Die Analyseperiode möglichst kurz gewählt werden (z.B. täglich), um die dynamischen Änderungen ausreichend genau erfassen zu können. Dargestellt wird der Terminengpass durch einen symbolisierten Terminkalender. (Bild 5.5b)

**5.3.3 Komplettierer (Auftragsverfügbarkeitsengpass)**

Startterminabweichungen erzeugen Turbulenzen im Ablauf (z.B. Überholaufträge, notwendige Kapazitätsanpassungen) oder führen zu geringer Endtermintreue. Um mit der Bearbeitung eines Auftrags beginnen zu können, müssen die für den Auftrag notwendigen Komponenten verfügbar sowie der Auftrag freigegeben sein. Fehlende verbrauchsorientiert disponierte Komponenten lassen sich über die im Abschnitt 5.3.5 dargestellte Analyse der Fehlbestandsreichweite ermitteln. Bei bedarfsorientierter Disposition hängt

die Verfügbarkeit der benötigten Komponenten unmittelbar von der Verfügbarkeit der zugehörigen Versorgeraufträge ab. Als Versorgeraufträge werden alle zum Start eines Auftrags benötigten zuliefernden Aufträge bezeichnet. Der Versorgerauftrag mit der höchsten Terminabweichung heißt *Komplettierer*. Präziser müsste der Komplettierer als Auftragsverfügbarkeitsengpass bezeichnet werden. Zur einfacheren Kommunikation wird der in der Praxis geläufige Begriff des Komplettierers verwendet.

Ein Sonderfall des Komplettierers ist die fehlende Auftragsfreigabe des Auftrags. Fehlt die Freigabe, kann der Auftrag trotz rechtzeitiger Verfügbarkeit aller Versorgeraufträge nicht gestartet werden. Dieser Fall tritt insbesondere bei bestandsregelnden Steuerungsverfahren wie beispielsweise Conwip auf (Lödding 2016, S. 343–346).

Die Ermittlung der Terminabweichung erfolgt wie in Bild 5.6a dargestellt für die Versorgeraufträge sowie die Freigabe:

- Für jeden Versorgerauftrag wird die Terminabweichung als Differenz zwischen dem Ist-Endtermin des Versorgerauftrags und dem Soll-Starttermin des zu beliefernden Auftrags ermittelt. Sind die Terminabweichung der Auftragsfreigabe und des spätesten Versorgerauftrags identisch, deutet dies auf eine Materialverfügbarkeitsprüfung im Rahmen der Freigabe hin.
- Die Terminabweichung der Auftragsfreigabe entspricht der Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Auftragsfreigabe und dem Soll-Starttermin des Auftrags.

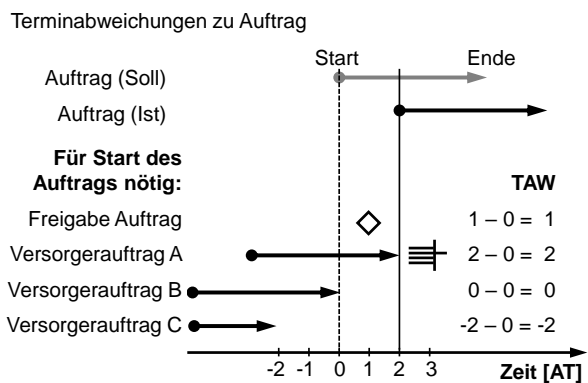
**a) Berechnung: Terminabweichung**

Freigabe	Versorgeraufträge
$TAW = FGA_{Ist} - STA_{Soll}$	$TAW = ETV_{Ist} - STA_{Soll}$

mit  
 TAW Terminabweichung [ZE]  
 FGA<sub>Ist</sub> Ist-Freigabe Auftrag [ZE]  
 STA<sub>Soll</sub> Soll-Starttermin Auftrag [ZE]  
 ETV<sub>Ist</sub> Ist-Endtermin Versorgerauftrag [ZE]

≡ Komplettierer KT: Kalendertage    ●→ Auftrag    ◇ Auftragsfreigabe

**b) Beispiel**



**Bild 5.6** Ermittlung des Komplettierers (Auftragsverfügbarkeitsengpass)



Der Komplettierer kann prinzipiell für jeden Auftrag ermittelt werden. Aus logistischer Sicht ist die Ermittlung des Komplettierers insbesondere für Aufträge mit verspätetem Starttermin relevant, da ein verzögerter Start häufige Ursache für Eilaufträge oder Endterminabweichungen ist.

Die Ermittlung des Komplettierers stellt hohe Anforderungen an die vorhandenen Daten und deren Auswertung: Die strukturellen und zeitlichen Zusammenhänge zwischen Auftrag, Auftragsfreigabe sowie den Versorgeraufträgen müssen präzise abgebildet sein. Dies erfordert in der Regel zusätzliche, über das ERP-System hinausgehende, Aufzeichnungen.

Aufgrund des hohen Aufwands sollte die Analyse nur für Produktionsmodule erfolgen, in denen sich die Startterminabweichungen ansonsten nicht erklären lassen. Im Gegensatz zu den anderen Engpassanalysen erfolgt die Analyse des Komplettierers nicht periodenbezogen, sondern ereignisbezogen für jeden Auftrag. Der Komplettierer wird mit einem stilisierten Auftragsnetz gekennzeichnet. (Bild 5.6b)

### 5.3.4 Mix-Flexibilitätsengpass

Der Mix-Flexibilitätsengpass schränkt die wirtschaftliche Produktion unterschiedlicher Artikel in kleinen Losgrößen ein. Je kleiner die wirtschaftlich produzierbaren Losgrößen, desto geringer können Pufferbestände und damit Durchlaufzeiten sein. Angelehnt an Ungern-Sternberg et al. (2020b) ist dasjenige Arbeitssystem mit dem höchsten Flexibilitätskennwert der *Mix-Flexibilitätsengpass*.

Die in Bild 5.7a dargestellte Ermittlung des Flexibilitätskennwerts (FK) basiert auf folgender Überlegung: Die zeitliche Belastung, die ein Auftrag an einem Arbeitssystem verursacht, setzt sich aus Bearbeitungs- und Rüstzeit zusammen. Je geringer der Rüstanteil (RA, Rüstzeit im Verhältnis zur Summe aus Bearbeitungs- und Rüstzeit), desto geringer die Kapazitätsverschwendung zum Rüsten des Arbeitssystems. Eine alleinige Betrachtung des Rüstanteils reicht jedoch nicht aus, da ein geringer Rüstanteil auch durch hohe Lagerbestandsreichweiten (RW) der produzierten Artikel erreichbar ist. Um den Mix-Flexibilitätsengpass zu ermitteln, sind daher Rüstanteile und Lagerbestandsreichweiten der produzierten Artikel zueinander in Bezug zu setzen.

**a) Berechnung: Flexibilitätskennwert**

$$FK = RA \times RW$$

mit

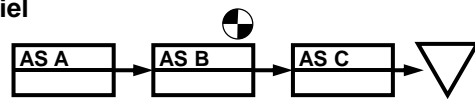
FK Flexibilitätskennwert [% ZE]

RA Rüstanteil [%]

RW Reichweite [ZE]



Mix-Flexibilitätsengpass in einer Periode

**b) Beispiel**

Parameter	Arbeitssystem		
	A	B	C
RA	10%	38%	25%
RW	1 d	1 d	1 d
FK	0,10 %d	0,38 %d	0,25 %d

**Bild 5.7** Ermittlung des Mix-Flexibilitätsengpasses (nach Ungern-Sternberg et al. 2020b, S. 246)

Die Berechnung des Flexibilitätskennwerts erfolgt anhand von Auftragsdaten. Insbesondere bei nicht überlappender losweiser Fertigung beeinflusst der Mix-Flexibilitätsengpass die Bestände und Durchlaufzeiten an allen für die Produktion des Auftrags beteiligten Arbeitssystemen. (Ungern-Sternberg et al. 2020b, S. 249)

Die Ermittlung des Mix-Flexibilitätsengpasses sollte für jedes Produktionsmodul erfolgen. Durch die Wahl einer kurzen Analyseperiode lassen sich ungünstig eingesteuerte Aufträge erkennen. Grundsätzlich sollte jedoch eine längere Analyseperiode gewählt werden, um dauerhaft unflexible Arbeitssysteme zu identifizieren. Markiert wird der Mix-Flexibilitätsengpass durch ein stilisiertes Rüstrad. (Bild 5.7b)

### 5.3.5 Lagerfehlteil (Lagerverfügbarkeitsengpass)

Fehlende Komponenten führen regelmäßig zu verzögerten Auftragsstarts oder verspäteten Lieferungen an den Kunden. Insbesondere die verbrauchsorientierte Disposition unterstellt üblicherweise, dass Artikel stets in ausreichender Menge vorhanden sind. Der verbrauchsorientiert disponierte Artikel mit der höchsten Fehlbestandsreichweite wird als *Lagerfehlteil* bezeichnet.

Die in Bild 5.8a dargestellte Ermittlung der Fehlbestandsreichweite basiert auf folgender Überlegung: Abhängig von Zu- und Abgängen sowie weiteren Faktoren werden je Artikel Bestandsgrenzen festgelegt. Die Bestandsgrenze ist in der Regel so ausgelegt, dass der gewünschte Servicegrad für den Artikel erreichbar ist. Der Grenzbestand (GB) sollte daher nicht unterschritten werden.

Um Artikel mit unterschiedlichen Bedarfsmengen miteinander vergleichen zu können, wird anhand des Fehlbestands ( $GB - B$ ) und der mittleren Bedarfsrate ( $BR$ ) die Fehlbestandsreichweite ( $FBRW$ ) für jeden Artikel ermittelt. Relevant für die Ermittlung der Lagerfehlteile sind lediglich Artikel, deren Bestand unterhalb der Bestandsgrenze liegt.

**a) Berechnung: Fehlbestandsreichweite**

$$FBRW = \begin{cases} \frac{GB - B}{BR}, & GB - B > 0 \\ 0, & GB - B \leq 0 \end{cases}$$

mit

B Bestand [ME]

GB Grenzbestand [ME]

BR Mittlere Bedarfsrate [ME/ZE]

FBRW Fehlbestandsreichweite [ZE]

∇ Lagerverfügbarkeitsengpass in einer Periode

**b) Beispiel (ein Artikel pro Lager)**



Parameter	Lagerartikel		
	A	B	C
B	150 St	40 St	36 St
GB	250 St	30 St	60 St
BR	100 St/d	20 St/d	18 St/d
FBRW	1 d	0 d	1,3 d

**Bild 5.8** Ermittlung des Lagerfehlteils (Lagerverfügbarkeitsengpasses)

Die vorgestellte Berechnung der Fehlbestandsreichweite geht von der vereinfachenden Annahme aus, dass nur für Artikel mit regelmäßigen Bedarfen Grenzbestände definiert sind und deren Unterschreitung unmittelbar auf die Servicegrade wirken. Eine präzisere Ermittlung der Fehlbestandsreichweite erfordert Kenntnisse über die exakten Zu- und Abgänge für die analysierten sowie zukünftigen Perioden. Die dafür notwendigen, umfangreichen Berechnungen erfüllen die Anforderungen an eine pragmatische Methode jedoch nicht.

Das Lagerfehlteil müsste präziser als Lagerverfügbarkeitsengpass bezeichnet werden. Aufgrund in der Praxis bestehender Konventionen wird jedoch der vereinfachende Begriff Lagerfehlteil verwendet.

Die Ermittlung der Fehlbestandsreichweite erfolgt für jedes, einem Produktionsmodul zugeordnete Lager. Zur Berechnung werden zunächst die Fehlbestandsreichweiten aller Lagerartikel des betrachteten Lagers ermittelt. Anschließend wird dem Lager die höchste so ermittelte Fehlbestandsreichweite zugewiesen. Grundsätzlich sollte eine kurze Analyseperiode gewählt werden, um auch kurzzeitige Lagerfehlteile erkennen zu können. Markiert wird der Engpass durch ein Fehlzeichen. (Bild 5.8b)

## 5.4 Systemgliederung

Um ein umfangreiches System analysieren zu können, gilt es, dieses zunächst geeignet zu gliedern. Ziel des vorgestellten Vorgehens zur Systemgliederung ist es, Subsysteme zu bilden, die sich möglichst unabhängig analysieren und anschließend verbessern lassen. Im Mittelpunkt der Gliederung stehen die Arbeitssysteme als zentrale Elemente der Leistungserbringung. Das in der Arbeit verwendete zweistufige Vorgehen zur Gliederung ist angelehnt an die Segmentierung der Wertstromanalyse nach Erlach (2020, S. 38–45) und erweitert diese um die Modulbildung (vgl. ausführlich Abs. 3.2.4)

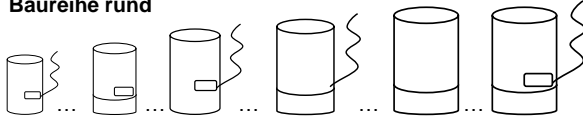
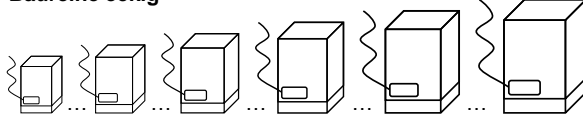
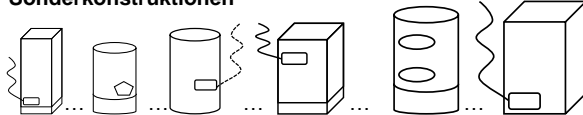
Die folgenden Abschnitte beschreiben das Vorgehen zur Systemgliederung in Segmente und Module. Zudem illustrieren sie es anhand eines durchgehenden Beispiels.

### 5.4.1 Segmentbildung

Ziel der Segmentbildung ist es, das System so zu gliedern, dass unabhängige Subsysteme entstehen. Idealerweise sind Produkte vollständig und ohne Verbindung zu anderen Segmenten innerhalb eines Segments herstellbar.

Die Definition der Segmente erfolgt top-down unter Berücksichtigung der in Abs. 3.2.4 beschriebenen Kriterien. Für die erste Iteration der Analyse reicht in der Regel eine einstufige Hierarchie mit wenigen Segmenten aus. Die Produktstrukturen aller in einem Segment zusammengefassten Produkte sollten in ihrem prinzipiellen Aufbau möglichst ähnlich sein. Zunächst werden Produktfamilien daher anhand der Artikel- und Prozessmerkmale gebildet. Anschließend erfolgt gegebenenfalls eine weitere Differenzierung anhand des Geschäftstyps (vgl. Bild 3.4).

Bild 5.9a zeigt exemplarisch repräsentative Produkte aus dem variantenreichen Produktionsprogramm eines Lampenherstellers. Die Lampen bestehen in der Regel aus Grundkörper, Boden, Elektronik sowie Kabel. Den höchsten Anteil an der Produktionsmenge besitzt die Baureihe der runden Lampen.

**a) Beispiel: Lampenhersteller****Baureihe rund****Baureihe eckig****Sonderkonstruktionen****b) Segmentbildung****Segment 1: Standardlampen rund**

Produktfamilie: Baureihe rund, ohne Anpassungen

Geschäftstyp: Standardprodukte ab Lager

**Segment 2: Standardlampen eckig**

Produktfamilie: Baureihe eckig, ohne Anpassungen

Geschäftstyp: Standardprodukte ab Lager

**Segment 3: Sonderlampen**

Produktfamilie: Baureihen rund und eckig, mit Anpassungen

Geschäftstyp: Sonderprodukte ab Produktion

**Bild 5.9** Segmentbildung (Beispiel Lampenhersteller)

Im Beispiel ergeben sich drei Segmente (Bild 5.9b): Produktionsrelevant ist zunächst die Unterscheidung anhand der zwei Baureihen, da die Montage runder und eckiger Serienlampen aufgrund unterschiedlicher Vorrichtungen auf unterschiedlichen Linien erfolgt. Zusätzlich stellt das Unternehmen, aufbauend auf einer der beiden Baureihen, Sonderlampen her. Produktion und Montage der Sonderlampen erfolgen in einer Werkstatt in Losgröße 1.

Standardlampen rund		
Absatz	1230 St/d	<i>Gewichtung</i>
Umsatzanteil	30 %	
# Produktvar. <sub>(ABC/D)</sub>	240 (30; 60; 90; 60)	<i>Struktur</i>
# Kunden <sub>(ABC/D)</sub>	300 (10; 50; 120; 120)	
Liefertreue	95%	<i>Zuverlässigkeit</i>
Lieferzeit	25 AT	<i>Geschwindigkeit</i>
...		<i>situationsbezogene Kennzahlen</i>

**Bild 5.10** Relevante Segmentkennzahlen im Datenkasten (Beispiel Segment 1)

Jeder Kundenauftrag bzw. jede Kundenauftragsposition wird anschließend eindeutig einem der Segmente zugeordnet. Der in Bild 5.10 dargestellte Datenkasten fasst die relevanten Kennzahlen des Segments aus externer Kundensicht in fünf Gruppen zusammen:

- Die *Gewichtung* zeigt die Relevanz des Segments im Vergleich zu anderen Segmenten. Die Quantifizierung erfolgt in der Regel anhand des Absatzes sowie des Anteils am Gesamtumsatz.
- Die *Struktur* beschreibt die angebotene Produktvielfalt im Segment sowie die Anzahl der belieferten Kunden. Die Gesamtzahl der abgesetzten Produkte wird, angelehnt an die ABC-Verteilung, anhand der Absatzmenge in vier Klassen eingeteilt. Produkte der Klasse D werden zwar angeboten, wurden im Betrachtungsbereich jedoch nicht abgesetzt. Üblicherweise umfasst Klasse A 80%, Klasse B die nächsten 15% und Klasse C die letzten 5% der abgesetzten Menge. Die Einteilung der Kunden erfolgt analog anhand des Umsatzes.
- Die Beschreibung der *Zuverlässigkeit* des Segments erfolgt über die Liefertreue. Sie wird üblicherweise als Prozentwert ausgedrückt und beschreibt die korrekte Erfüllung des Lieferversprechens bezüglich Art, Menge, Termin und Ort.
- Die *Geschwindigkeit* des Segments wird über die Lieferzeit ausgedrückt. Sie beschreibt die Zeit vom Eingang der Kundenbestellung bis zum Eingang der Ware beim Kunden.
- In der letzten Gruppe lassen sich weitere *situationsbezogene Kennzahlen* darstellen. Abhängig von der konkreten Situation zählen dazu beispielsweise die Anzahl der Fabrikstage oder das Schichtmodell des Segments.

Die Gruppen orientieren sich an den Kategorien zur Beschreibung der logistischen Zielerreichung (vgl. Abs. 3.3.1). Das verwendete Symbol ist an das Kundenhaus aus der Wertstromdarstellung angelehnt.

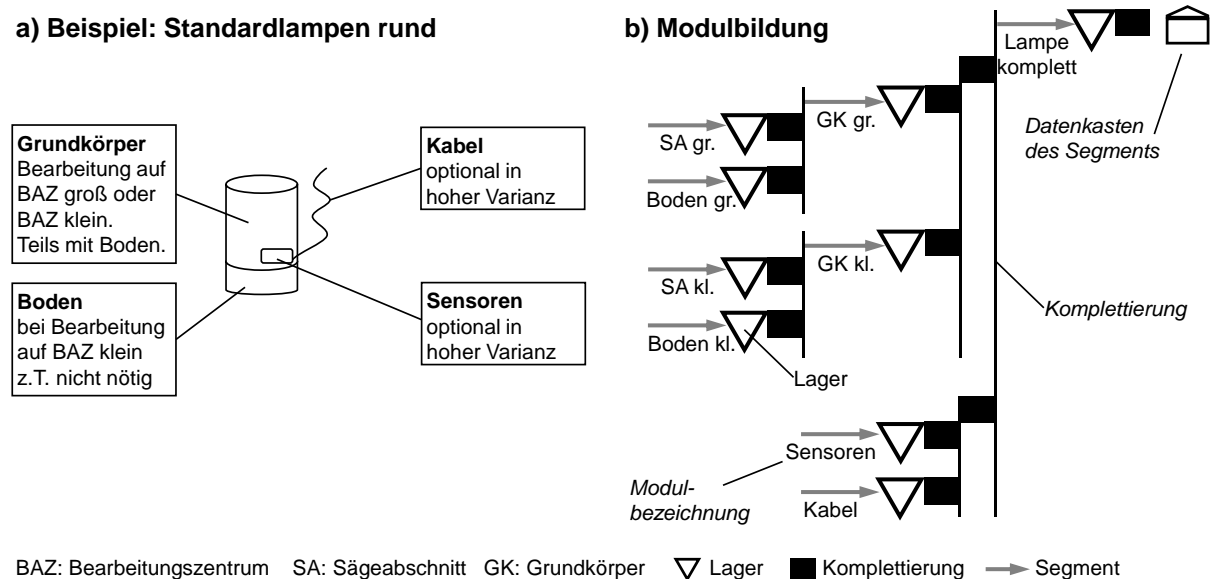
#### **5.4.2 Modulbildung**

Ziel der Modulbildung ist es, ein zuvor definiertes Segment aus Produktionssicht so zu gliedern, dass unabhängige Subsysteme entstehen, in denen Herstellaufträge jeweils vollständig bearbeitet werden können. Über die Modulbildung wird die Produktstruktur aus Produktionssicht abgebildet.

Die Definition der Module erfolgt top-down unter Berücksichtigung der in Abs. 3.2.4 beschriebenen Kriterien. Dazu werden zunächst Komponentenfamilien anhand der Artikel-

und Prozessmerkmale gebildet. Anschließend erfolgt gegebenenfalls eine weitere Differenzierung anhand des Vielfaltstyps (vgl. Bild 3.5).

Bild 5.11a zeigt einen Repräsentanten aus zuvor beispielhaft definiertem Segment 1 (Standardlampen rund) mit vier Komponentenfamilien. Bei der Wahl des Repräsentanten ist darauf zu achten, dass er alle Komponentenfamilien beinhaltet. Alternativ sind mehrere Repräsentanten auszuwählen, um ein umfassendes Abbild des Segments zu erhalten.



**Bild 5.11** Modulbildung (Beispiel Segment 1)

Bild 5.11b zeigt das Ergebnis der Modulbildung. Die Visualisierung der grundlegenden Segmentstruktur und der Verbindung der einzelnen Module erfolgt über drei Symbole:

- Ein Pfeil repräsentiert ein Modul und damit den Übergang von lagerfähigen Artikeln in einem definierten Ausgangszustand in lagerfähige Artikel in einem definierten Endzustand.
- Ein auf der Spitze stehendes Dreieck symbolisiert ein Lager. Es repräsentiert alle Artikel, die über die Pfeile zu- und abfließen.
- Ein vertikaler Strich verknüpft die einzelnen Module aus Produktsicht. Um die Artikel in dem rechts des Strichs dargestellten Moduls herstellen zu können, kann die Artikel-lieferung aus den links des Strichs liegenden Modulen notwendig sein.

Im Beispiel besteht eine Standardlampe immer aus einem Grundkörper sowie optionalen Sensoren und einem optionalen Kabel. Aus Produktionssicht ist es sinnvoll, kleine und große Grundkörper zu unterscheiden, da diese auf unterschiedlichen Bearbeitungszentren gefertigt werden. Jeder Grundkörper besteht immer aus einem Sägeabschnitt sowie einem optionalen Boden. Die sogenannte Komplettierungsstruktur beschreibt Abschnitt 5.5.1 ausführlich.

Alle Hersteaufträge sind anschließend an die Modulbildung eindeutig einem der Module zuzuordnen. Die Module müssen so definiert sein, dass jeder Auftrag vollständig in einem Modul abbildbar ist, d.h. alle Arbeitsgänge des Auftrags innerhalb des Moduls durchgeführt werden. Läger bilden somit die Schnittstelle eines Moduls und folglich ist die Abbildung von Lägern innerhalb eines Moduls nicht zulässig.

Nach einer ersten schlüssigen Gliederung des Systems in Segmente und Module sind die Gliederungskriterien nachvollziehbar zu dokumentieren. Anschließend beginnt die Analyse des Systemverhaltens. Eine iterative Anpassung der gewählten Systemgliederung kann analog zu Anpassungen bei der Produktfamilienbildung in der Wertstromanalyse erfolgen. Eine Anpassung ist insbesondere dann notwendig, wenn sich anhand der gewählten Gliederung keine Ursachen für Verhaltensabweichungen identifizieren lassen. Häufig ist dies der Fall, wenn die Gliederung zu grob ist oder sie bestehende Kausalzusammenhänge vernachlässigt.

## 5.5 Visualisierung des Systems

Ziel der Visualisierung ist es, die relevanten Struktur- und Verhaltenseigenschaften des Systems übersichtlich darzustellen. Dazu verwendet die Arbeit, angelehnt an die Artikel- und Ressourcensicht, zwei aufeinander aufbauende Visualisierungen:

- Das *Produktnetz* zeigt ein Segment sowie dessen aus Modulen bestehende Grundstruktur im Überblick. Anhand des Produktnetzes lassen sich logistisch relevante Module auswählen.
- Der modifizierte *Wertstrom* zeigt die logistisch relevanten Ausschnitte des Moduls, insbesondere die Arbeitssysteme und ihre Eigenschaften, im Detail.



Der Aufbau der Visualisierungen erfolgt schrittweise. Das reduziert die durchzuführenden Analysen und Datenaufbereitungen auf ein Minimum. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben den Aufbau der Visualisierungen anhand des im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Beispiels (Standardlampe rund).

### 5.5.1 Produktnetz

Ziel des sogenannten Produktnetzes ist es, das Zusammenspiel aus Produktstruktur und logistischem Verhalten in einer Gesamtabbildung darzustellen, um Ursachen der Dispositionskomplexität auf hoher Abstraktionsebene identifizieren zu können. Das Produktnetz ist eine Weiterentwicklung des aus der Aufbauübersicht abgeleiteten Kundenauftragsdiagramms nach Wiendahl (2014, S. 273) sowie dem Durchlaufplan nach Schönsleben (2020, S. 32, 36). Anders als dort stellt das Produktnetz jedoch ein ganzes Produktionssegment mit einer Vielzahl an ähnlichen Produkten und nicht ein einzelnes Produkt dar.

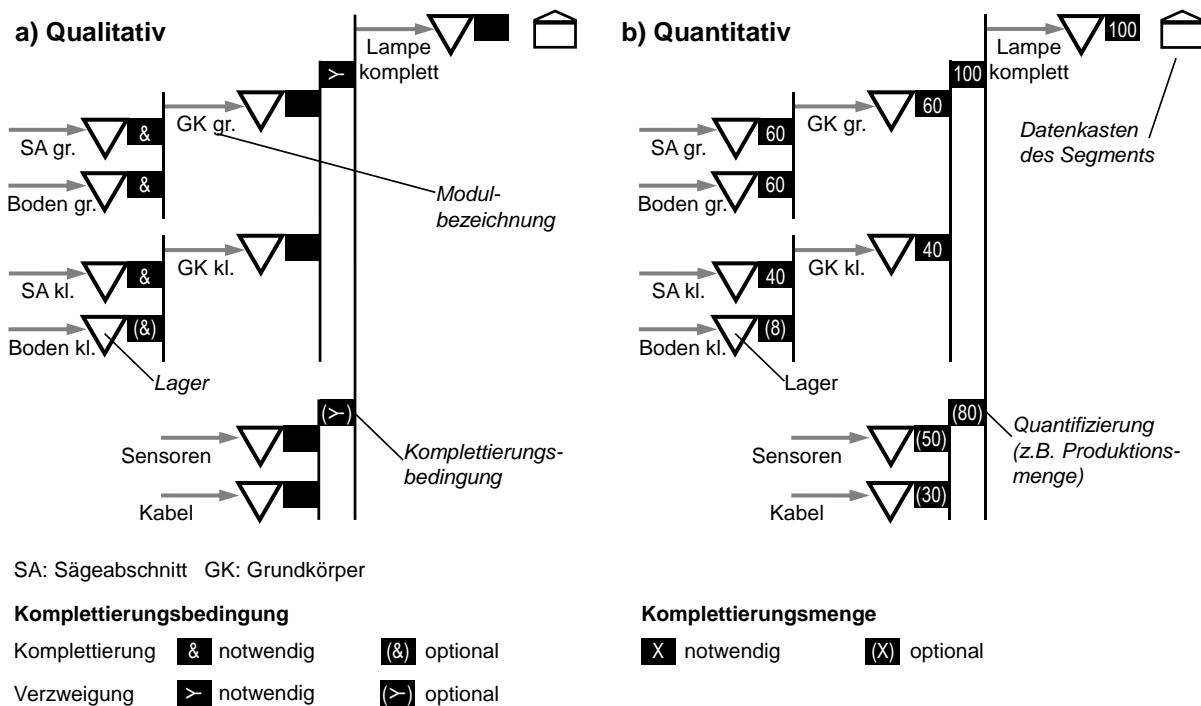
Der Aufbau des Produktnetzes erfolgt iterativ in vier Stufen. Jede Stufe stellt zusätzliche Informationen bereit:

1. Die erste Stufe beschreibt und quantifiziert über die *Komplettierungsstruktur* die grundlegenden logischen Verknüpfungen der Module innerhalb des Segments.
2. Die zweite Stufe skaliert das Produktnetz mit den Standarddurchlaufzeiten und zeigt die *Dispositionsstruktur* der Läger sowie die Kundenentkopplungsebene.
3. Die dritte Stufe zeigt *Kennzahlen* in Datenkästen und visualisiert das Verhalten und die Verhaltensabweichungen der einzelnen Module.
4. In der vierten Stufe erfolgt die *Engpasskennzeichnung*, eine Priorisierung der weiteren Schritte.

Die Positionierung der einzelnen Elemente des Produktnetzes bleibt während der Detaillierung grundsätzlich konstant. Dies vereinfacht die Orientierung, ähnlich wie die Nordausrichtung bei Landkarten. Der Abschnitt erläutert die verwendeten Symbole schrittweise. Die Legende in Anhang A.3 fasst alle verwendeten Symbole des Produktnetzes zusammen.

### Stufe 1: Komplettierungsstruktur

Für die Herstellung eines einzelnen Produktes ist häufig nur eine Auswahl an Modulen bzw. der durch sie repräsentierten Komponenten innerhalb des Segments notwendig. Die Verknüpfung der Module zur Herstellung eines Produkts heißt *Komplettierungsstruktur*. Die logischen Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen heißen *Komplettierungsbedingungen*. Die Darstellung der Komplettierungsstruktur erweitert die Visualisierung der Modulbildung (Bild 5.11b) qualitativ und quantitativ.



**Bild 5.12** Produktnetz – Stufe 1: Komplettierungsstruktur

Bild 5.12a zeigt die qualitative Komplettierungsstruktur anhand des fortgeführten Beispiels. Für die Produktion einer Lampe ist immer ein Grundkörper notwendig (notwendige Komplettierung), wobei einer von zwei unterschiedlichen Grundkörpern ausgewählt werden muss (notwendige Verzweigung):

- Der Grundkörper groß besteht immer aus einem Sägeabschnitt und einem Boden (notwendige Komplettierung).
- Der Grundkörper klein besteht immer aus einem Sägeabschnitt, der Boden ist jedoch nicht immer notwendig (optionale Komplettierung).

- Manche Lampen haben Zusatzkomponenten (Sensoren, Kabel), diese sind jedoch nicht notwendig (optionale Verzweigung).

Die qualitative Darstellung gibt erste Hinweise auf zugrundeliegende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. So ist beispielsweise bei einem notwendigen Komplettierer davon auszugehen, dass die Endterminabweichung eines Komplettierers unmittelbar eine Startterminabweichung im nachfolgenden Modul verursacht.

Neben der qualitativen Darstellung ist auch eine quantitative Darstellung möglich. Bild 5.12b zeigt dies beispielhaft anhand der Produktionsmenge. Alternativ sind die Produktionskosten darstellbar. Anhand der gewählten Quantifizierung lassen sich Elemente innerhalb der Darstellung priorisieren. Dazu werden die Module mit abnehmender Wichtigkeit von rechts oben nach links unten sortiert.

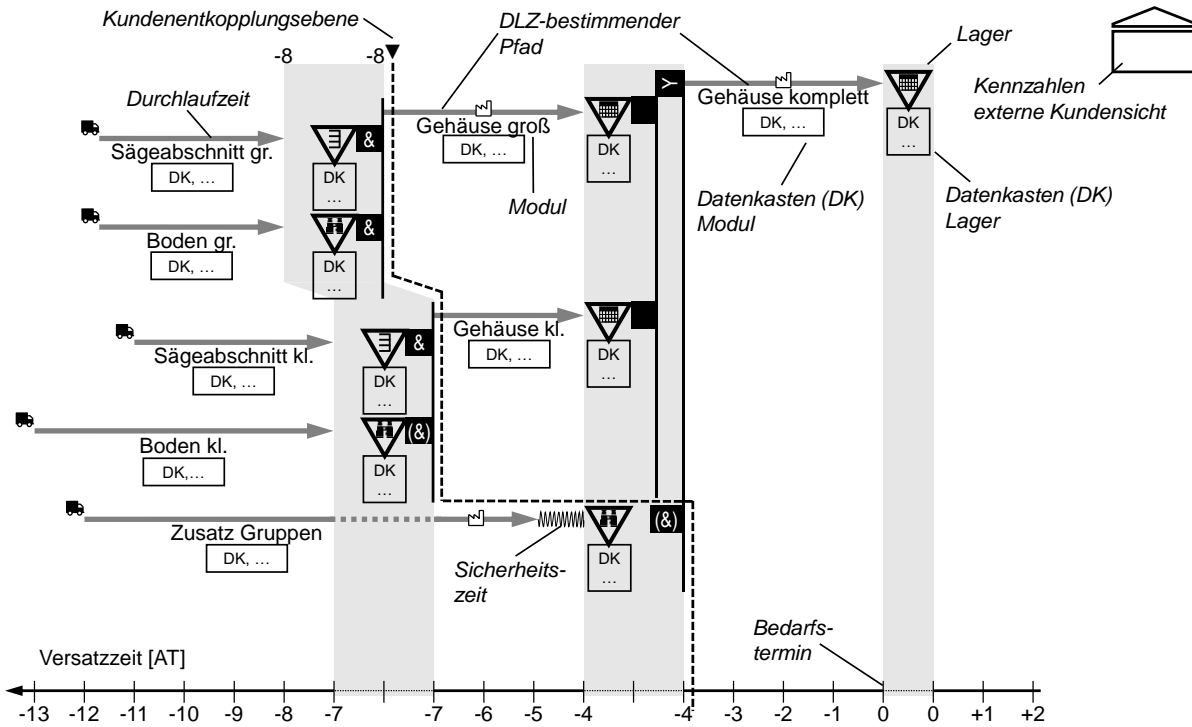
Insbesondere bei optionalen Komplettierern und optionalen Verzweigungen dient die quantitative Darstellung der Priorisierung der weiteren Analysen. Der Aufbau der qualitativen Darstellung sollte zunächst über aufwandsarme Expertenbefragungen erfolgen. Die Validierung und Bestimmung der Kennzahlen, insbesondere für die quantitative Darstellung kann anschließend über Datenauswertungen erfolgen.

### **Stufe 2: Dispositionsstruktur**

Kurze Standarddurchlaufzeiten innerhalb eines Segments sind insbesondere bei variantenreichen Produkten von besonderer Bedeutung für die logistische Zielerreichung. Hohe Durchlaufzeiten bei hoher Variantenzahl erschweren die kundenanonyme Lagerung bei geringen Beständen.

Bild 5.13 visualisiert die Dispositionsstruktur: Zunächst wird dazu die Komplettierungsstruktur (Bild 5.12a) mit den Standarddurchlaufzeiten der einzelnen Module skaliert. Anschließend werden die zentralen dispositionsrelevanten Informationen der Läger ergänzt.

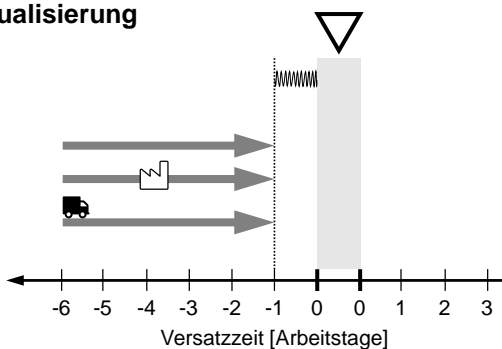
Darstellungsschwerpunkte sind die zentralen Module. Weniger relevante Module (Zusatzgruppen) sollten in einem zusammenfassenden Modul dargestellt werden. So lässt sich ein Segment einerseits vollständig und andererseits übersichtlich darstellen.



**Bild 5.13** Produktnetz – Stufe 2: Dispositionsstruktur

Die ansonsten durchgängig skalierte Zeitachse der Versatzzeit hat grau hinterlegte Unterbrechungen. So ist einerseits die Durchlaufzeit über Pfeile korrekt skaliert darstellbar. Andererseits sind Zusatzinformationen wie Lagerbestände in den grau hinterlegten Bereichen ohne Skalierung integrierbar.

**Visualisierung**



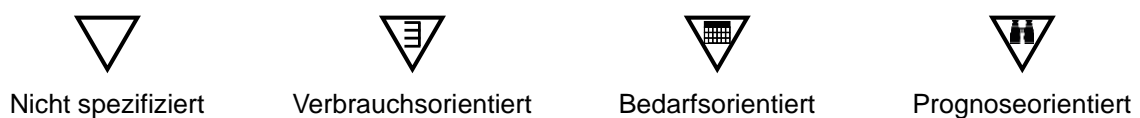
**Beschreibung**

- Sicherheitszeit**
- Soll-Durchlaufzeit bei...**
- ...Eigenfertigung
- ...Eigenfertigung mit Fremdarbeitsgang
- ...Fremdbeschaffung

**Bild 5.14** Legende der Modulpfeile

Um Ursachen für lange Durchlaufzeiten einfacher erkennen und erklären zu können, kann der Modulpfeil mit zusätzlichen Symbolen wie in Bild 5.14 dargestellt erweitert werden:

- **Sicherheitszeit:** Die Disposition verwendet die Sicherheitszeit, um Schwankungen der Endtermintreue abzufedern. Insbesondere bei Modulen, die nicht auf dem kritischen Pfad liegen, kann es sinnvoll sein, über die Sicherheitszeit die Termintreue der Module zu erhöhen. Die Sicherheitszeit ist als Feder dargestellt.
- **Fremdarbeitgänge:** Fremdarbeitgänge verlängern die Durchlaufzeit häufig überproportional. Sie sind durch ein Fabriksymbol auf dem Pfeil gekennzeichnet.
- **Fremdbeschaffungen:** Die Verantwortung für Durchlauf- bzw. Lieferzeiten von Fremdbeschaffungen liegt häufig außerhalb des direkten Einflussbereichs der Produktion, beispielsweise beim Einkauf. Das Lastwagensymbol kennzeichnet Fremdbeschaffungen.



**Bild 5.15**      Legende der Lagerdarstellung inkl. Dispositionsstrategie

Abhängig von der Dispositionsstrategie eines Lagers tritt entweder der Servicegrad der gelagerten Artikel oder die Termineinhaltung der Versorgeraufträge (Lagerzugang) in den Vordergrund. Um diese Unterschiede kenntlich zu machen, wird das Lagersymbol, wie in Bild 5.15 dargestellt, durch Zusatzsymbole zur Dispositionsstrategie ergänzt. (vgl. Abs. 3.2.1):

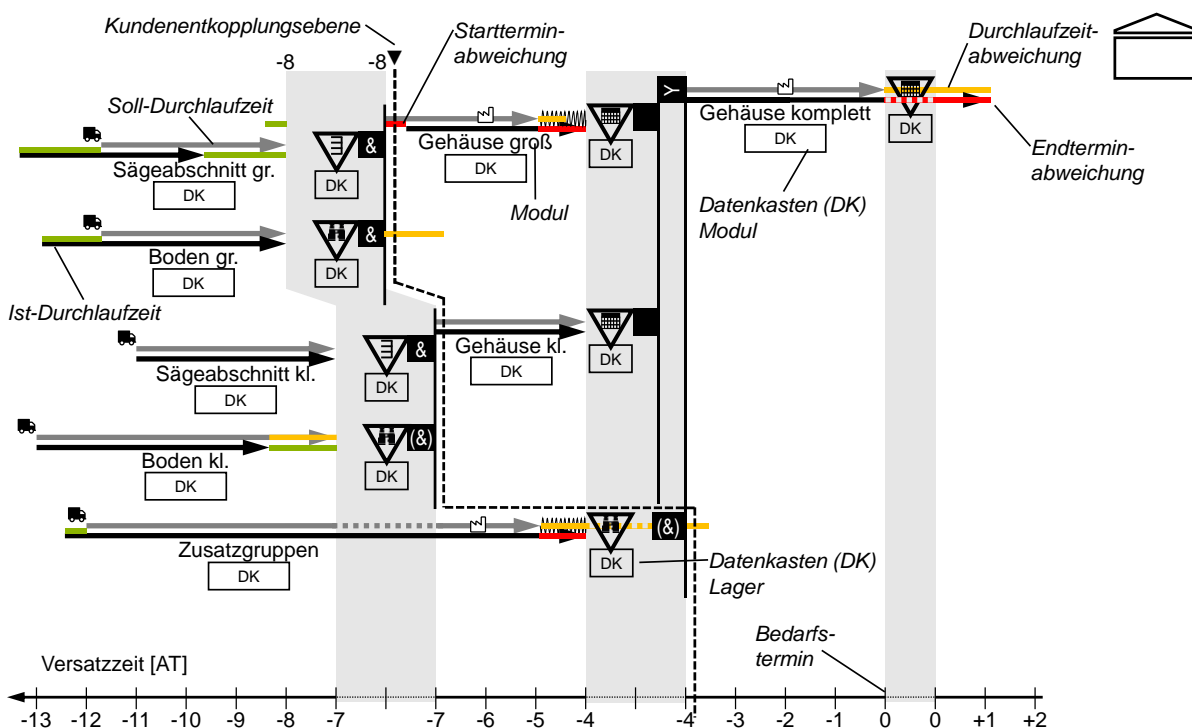
- **Nicht spezifiziert:** Ist die Dispositionsstrategie nicht eindeutig spezifiziert oder unbekannt, wird kein Zusatzsymbol verwendet.
- **Verbrauchsorientiert:** Das Kanbansymbol zeigt eine ausschließlich verbrauchsorientierte Disposition an.
- **Bedarfsorientiert:** Eine bedarfsorientierte Disposition ist über ein Kalendersymbol dargestellt.
- **Prognoseorientiert:** Ein Fernglas kennzeichnet die prognoseorientierte Disposition.

Durch die skalierte Darstellung der Durchlaufzeiten lässt sich der die Durchlaufzeit bestimmende Pfad im Produktnetz unmittelbar erkennen. Anhand der Dispositionsstrategie der

Lager lässt sich zudem die Kundenentkopplungsebene einzeichnen. Im Beispiel bilden die Durchlaufzeiten der Module Gehäuse (groß oder klein) und Gehäuse komplett den die Durchlaufzeit bestimmenden Pfad.

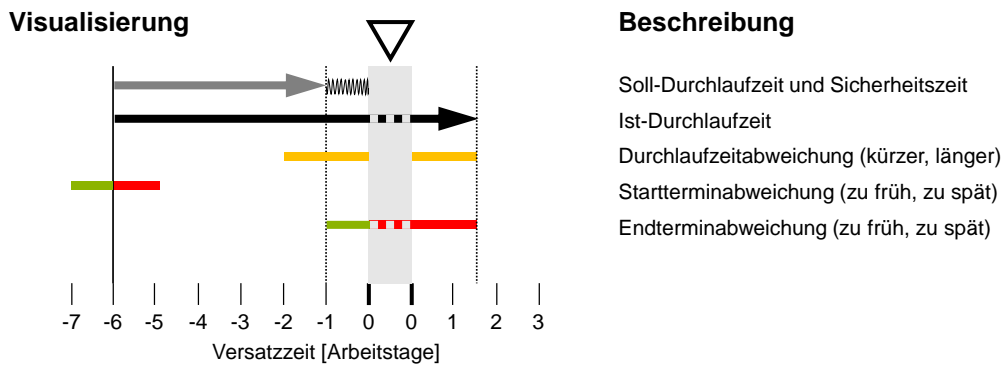
### Stufe 3: Kennzahlen

Die dritte Stufe erweitert das Produktnetz um Symbole und Kennzahlen zur Beschreibung des tatsächlichen Verhaltens und der Verhaltensabweichungen (Bild 5.16). Zentrales Kriterium zur Verhaltensbeschreibung sind in dieser Arbeit Durchlaufzeiten sowie Durchlaufzeit- und Terminabweichungen.



**Bild 5.16** Produktnetz – Stufe 3: Kennzahlen

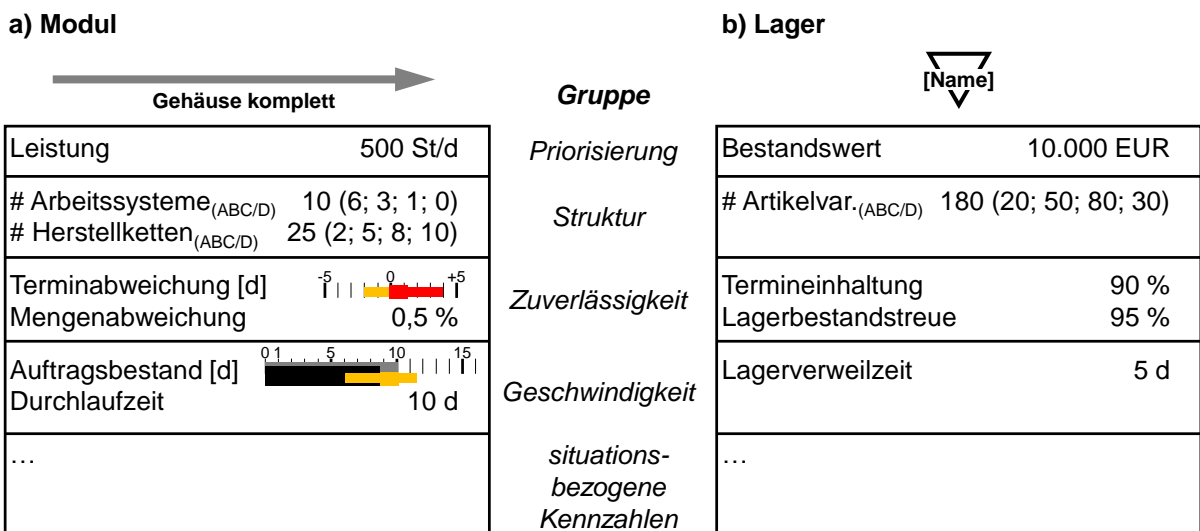
Um die Ursachen für Terminabweichungen identifizieren zu können, werden die Ist-Durchlaufzeit sowie deren Abweichungen im Produktnetz ergänzt. Bild 5.17 zeigt beispielhaft ein Modul mit Verspätung aufgrund von Starttermin- und Durchlaufzeitabweichungen.



**Bild 5.17** Legende der Terminabweichungen (Beispiel Verspätung)

Der graue Pfeil (Soll-Durchlaufzeit) wird durch einen schwarzen Pfeil ergänzt, der die mittlere Ist-Durchlaufzeit darstellt. Ein gelber Balken stellt den Betrag der mittleren Durchlaufzeitabweichungen dar. Rote Balken stellen verspätete, grüne Balken verfrühte Start- und Endtermine dar.

Neben den über die Pfeile und Balken dargestellten Kennzahlen sind weitere Kennzahlen zur Beschreibung von Struktur und Verhalten notwendig. Die Datenkästen zeigen Kennzahlen zur detaillierten Beschreibung der Module und Läger. (Bild 5.18)

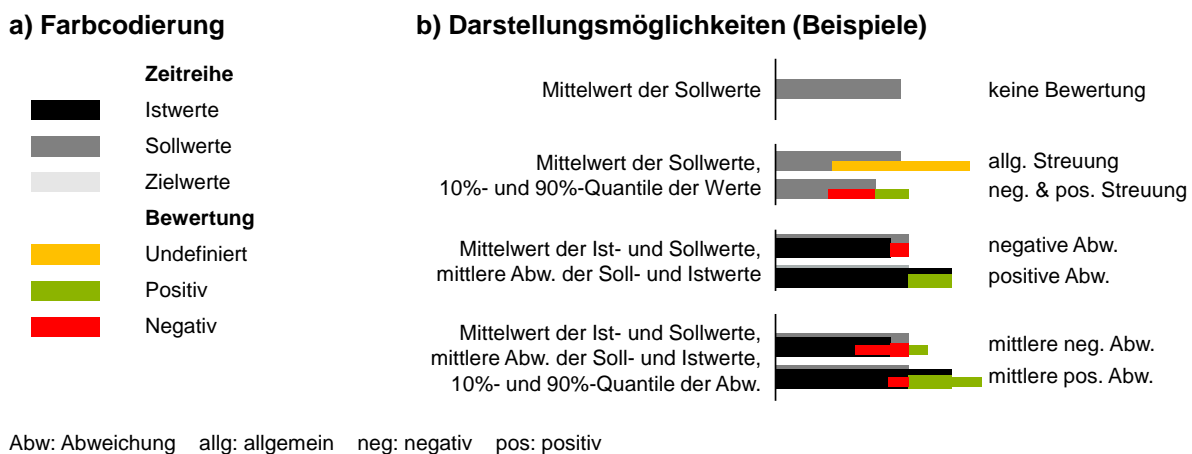


Artikelvar.: Artikelvarianten

**Bild 5.18** Legende der Datenkästen der Module und Läger (Beispiel)

Die Gliederung der Kennzahlen in den Datenkästen der Module (Bild 5.18a) und der Läger (Bild 5.18b) erfolgt analog zur Gruppierung im Datenkasten des Segments in fünf Gruppen (vgl. Bild 5.10). Im Gegensatz zum Datenkasten des Segments zeigen die Datenkästen der Module und Läger Kennzahlen aus interner Dispositionssicht. Eine detaillierte Beschreibung der Kennzahlen erfolgt in Abschnitt 6.4.

Zur einfacheren visuellen Interpretation lassen sich die Kennzahlen und deren Abweichungen zusätzlich über Datenbalken visualisieren. Die Darstellung der Datenbalken ist an die International Business Communications Standards nach Hichert et al. (2022) angelehnt. (Bild 5.19)



**Bild 5.19** Legende der Datenbalken

Der Grauwert eines Datenbalkens beschreibt die zugrundeliegende Zeitreihe, wobei gilt: Je dunkler die Farbe, desto eher entsprechen die Daten der Realität. Istwerte werden somit schwarz, Sollwerte grau und Zielwerte hellgrau dargestellt. Abweichungen werden bezüglich ihrer Wirkung bewertet: Rot deutet auf eine negative, grün auf eine positive und gelb auf eine nicht eindeutig bewertbare Abweichung hin. (Bild 5.19a)

Die Darstellung erfolgt in mehreren Detaillierungen: Die einfachste Darstellung zeigt lediglich den Mittelwert einer Kennzahl. Zusätzlich lässt sich die Streuung der Kennzahl darstellen und bewerten. Werden zwei unterschiedliche Zeitreihen übereinander dargestellt, ist die mittlere Abweichung oder alternativ die mittlere Abweichung und die Streuung der Abweichung zu erkennen. (Bild 5.19b)

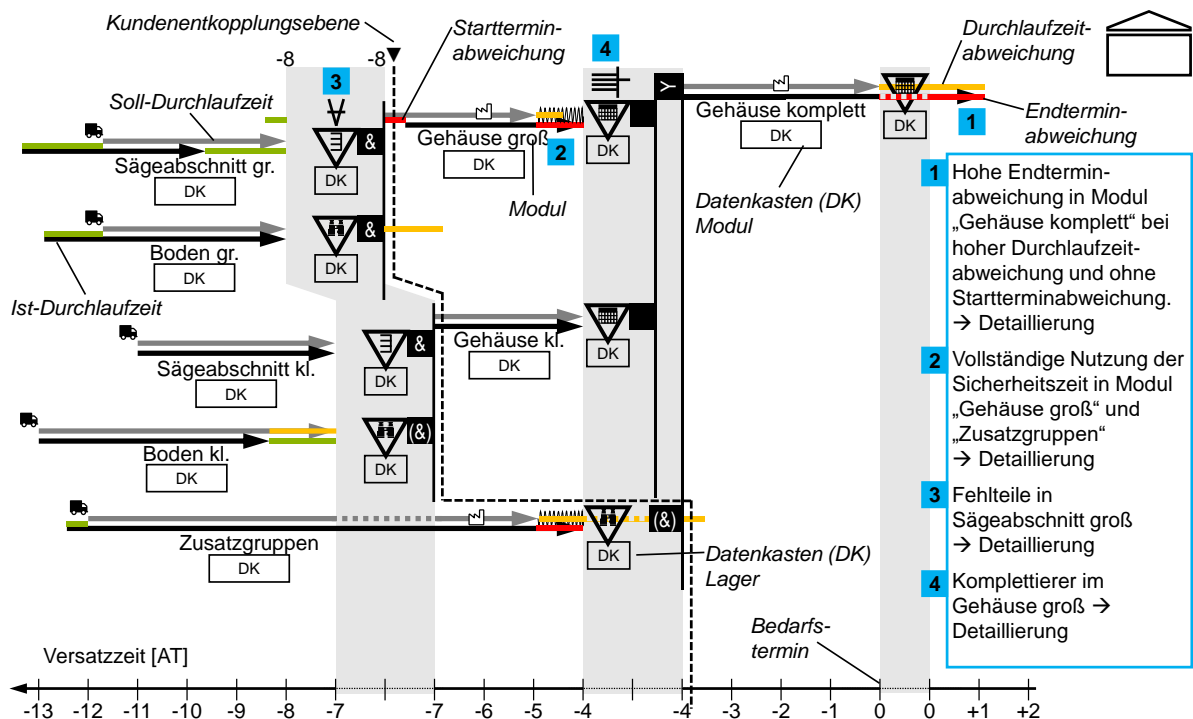


Anhand der in Stufe 3 ergänzten Ist-Durchlaufzeiten lassen sich kritische Module aus Verhaltenssicht identifizieren. Über die in den Datenkästen der Läger dargestellte Anzahl an Artikelvarianten kann die Variantenentstehung in Abhängigkeit von der Versatzzeit geprüft werden. Bestandswerte und Lagerverweilzeiten identifizieren kritische Läger.

Im Beispiel sollten drei Module aufgrund der hohen Verspätung detaillierter untersucht werden. Dies sind die Module „Gehäuse komplett“, „Gehäuse groß“ sowie die „optionalen Zusatzgruppen“. Auffällig ist die Startterminabweichung im Modul „Gehäuse groß“ trotz pünktlicher Versorger.

#### Stufe 4: Engpasskennzeichnung

Die Analyse umfangreicher Systeme kann zahlreiche Abweichungen und Schwachstellen aufzeigen. Um die logistische Leistung des Systems effizient zu verbessern, ist daher eine Priorisierung notwendig. Die letzte Stufe visualisiert daher Engpässe und fügt eine Priorisierung hinzu. (Bild 5.20)



**Bild 5.20** Produktnetz – Stufe 4: Engpasskennzeichnung

Im Produktnetz ist für jede Komplettierungsbedingung ein Engpass ermittelbar. Die betrachtete Engpassart hängt von der Dispositionsstrategie der verbundenen Läger ab:

- Das verbrauchsorientiert disponierte Lager mit der höchsten Fehlbestandsreichweite wird mit dem Symbol für das Lagerfehlteil markiert; hier das Lager des „Sägeabschnitts groß“.
- Das bedarfs- oder prognoseorientiert disponierte Lager mit der höchsten Anzahl an Komplettern wird mit dem Symbol für den Kompletter markiert; hier das Lager des „Gehäuses groß“.

Im Beispiel führt die Endterminabweichung des Moduls „Gehäuse groß“ teilweise zu fehlenden Komplettern. Trotz der im Mittel verfrühten Lieferung des Moduls „Sägeabschnitt groß“ treten teilweise Lagerfehlteile auf.

Eine schriftliche Zusammenfassung vervollständigt das Produktnetz. Sie dokumentiert die Analyseergebnisse, macht die getroffenen Schlussfolgerungen anhand der präsentierten Daten nachvollziehbar und priorisiert die nächsten Schritte. Ergebnis der vierten Stufe ist eine begründete Auswahl an Maßnahmen.

**Fazit:** Im Beispiel steht das Modul „Gehäuse komplett“ im Fokus. Aufgrund der hohen Endterminabweichung mit direkter Wirkung auf den Kunden wird es im nächsten Abschnitt exemplarisch näher betrachtet.

### 5.5.2 Wertstrom

Ziel der Darstellung als Wertstrom ist es, die einzelnen Arbeitssysteme und Puffer eines oder mehrerer ausgewählter Module mit ihren Kennwerten sowie den Materialflussverbindungen darzustellen. So lassen sich komplizierte Strukturen und Verhaltensabweichungen aus Ressourcensicht identifizieren.

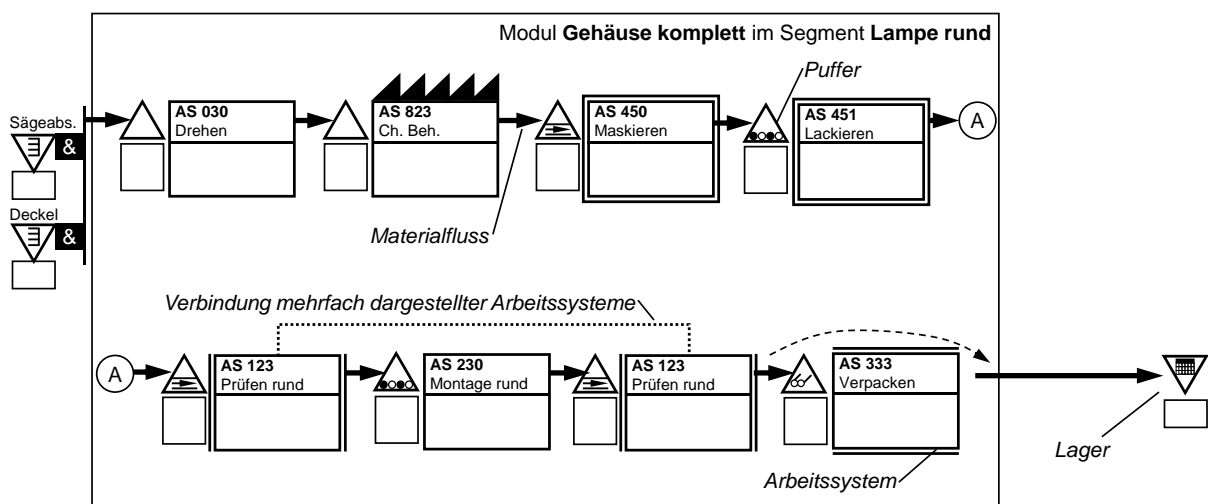
Der Aufbau des Wertstroms erfolgt stufenweise angelehnt an den Aufbau des Produktnetzes. Da im Gegensatz zum Produktnetz keine grundlegende Strukturierung des Betrachtungsbereichs mehr notwendig ist, ergeben sich drei Stufen:

1. Schwerpunkt der ersten Stufe ist die *Modulstruktur*. Sie zeigt die Arbeitssysteme inklusive der Materialflussverbindungen sowie die Reihenfolgebildung in den zugehörigen Puffern.

- Schwerpunkt der zweiten Stufe ist das Arbeitssystemverhalten. In dieser Stufe werden *Kennzahlen* für Arbeitssysteme und Puffer ergänzt.
- In der dritten Stufe erfolgt die *Engpasskennzeichnung* und eine Priorisierung der weiteren Schritte.

### Stufe 1: Modulstruktur

Zunächst gilt es, die grundlegende Struktur des Moduls zu beschreiben. Die zentralen Arbeitssysteme und Hauptmaterialflüsse lassen sich in der Regel über einen Produktionsrundgang in Kombination mit Experteninterviews mit geringem Aufwand ermitteln. Bild 5.21 zeigt den Wertstrom für das Beispielm modul „Lampe komplett“.



AS: Arbeitssystem Ch. Beh: Chemische Behandlung

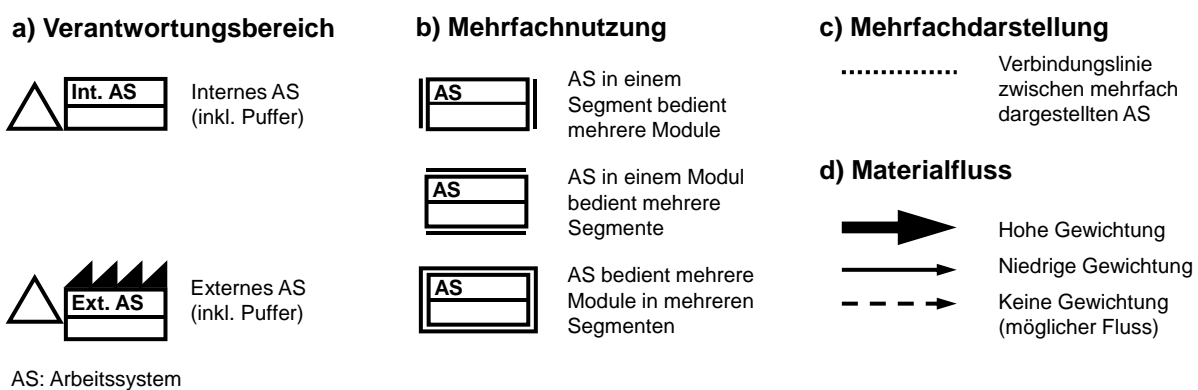
**Bild 5.21** Wertstrom – Stufe 1: Modulstruktur (angelehnt an Erlach 2020, S. 406–407)

Die Darstellung orientiert sich an der Wertstromdarstellung nach Erlach (2020), jedoch mit zwei zentralen Unterschieden:

- Lager* (auf der Spitze stehendes Dreieck) und *Puffer* (auf der Kante stehendes Dreieck) werden anhand des Artikelzustands eindeutig unterschieden (vgl. Abs. 3.2).
- Die Rechtecke stellen *Arbeitssysteme* und nicht Produktionsprozesse bzw. Arbeitsgänge dar. Zu einfacheren Orientierung werden die durch die Arbeitssysteme üblicherweise ausgeführten Arbeitsvorgänge in der Darstellung ergänzt. (vgl. Wiendahl 2017, S. 14–15; Erlach 2020, S. 56, 63; Koch 2018, S. 46–47)

Die Anpassungen sind notwendig, um die in den gängigen IT-Systemen übliche Strukturierung der Produktion einfach und eindeutig abbilden zu können. Die in der klassischen Wertstromdarstellung üblichen Informationsflüsse sowie die Zeitlinie sind nicht dargestellt, da diese von geringerer Bedeutung für die Ziele der Arbeit sind. Prinzipiell sind diese jedoch ergänzbar.

Jedes Arbeitssystem wird mit seinem zugehörigen Puffer dargestellt. Bild 5.22 erweitert die Darstellung der Arbeitssysteme über Zusatzsymbole.



**Bild 5.22** Legende der Arbeitssysteme inkl. Vernetzung

Neben der einfacheren Bewertung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen gibt die Erweiterung Hinweise zur Interpretation der in der nächsten Stufe dargestellten Daten:

- Verantwortungsbereich:** Interne Arbeitssysteme sind als Rechtecke dargestellt. Externe Arbeitssysteme werden mit einem skizzierten Sheddach versehen. Sie lassen sich in der Regel in geringerem Umfang beeinflussen. Zudem sind über sie häufig weniger Informationen vorhanden.
- Mehrfachnutzung:** Bei internen Arbeitssystemen wird die Mehrfachnutzung über die Art des Rahmens dargestellt. Je höher die Anzahl der Rahmenlinien, in desto mehr Modulen bzw. Segmenten wird das Arbeitssystem verwendet. Die Wirkung von Maßnahmen an solchen Arbeitssystemen ist daher häufig weitreichender und schwerer abzuschätzen.
- Mehrfachdarstellung:** Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit können Arbeitssysteme mehrfach dargestellt werden und über eine gepunktete Linie verbunden werden.

d) **Verbindungen:** Pfeile stellen die Materialflussverbindungen zwischen Arbeitssystemen dar. Die Pfeildicke gewichtet die Verbindungen. Je stärker die Verbindung, desto stärker ist in der Regel der Einfluss des Arbeitssystems auf die logistische Leistung des Moduls.

Der jedem Arbeitssystem zugeordnete Puffer repräsentiert die Warteschlange der zu bearbeitenden Aufträge am jeweiligen Arbeitssystem. Die verwendete Reihenfolgesteuerung kann innerhalb des Puffersymbols ergänzt werden. (Bild 5.23)



**Bild 5.23**      Legende der Pufferdarstellung inkl. Reihenfolgesteuerung

Die Reihenfolgesteuerung hat Auswirkungen auf die Durchlaufzeit und wird daher mit zusätzlichen Symbolen dargestellt:

- **Nicht spezifiziert:** Ist die Steuerung der Reihenfolge nicht spezifiziert oder unbekannt, wird kein Zusatzsymbol verwendet.
- **Go-See:** Die „Go-See“ Reihenfolgesteuerung ist durch situationsspezifische, vor Ort getroffene Entscheidungen gekennzeichnet. Die Durchlaufzeiten können stark schwanken. In der Regel liegen keine Informationen zur Soll-Reihenfolge vor. Sie ist über eine „Go-See“ Brille kodiert.
- **Sollreihenfolge:** Erfolgt die Reihenfolgesteuerung anhand einer Vorgabe, soll die Ist-Reihenfolge einer Sollreihenfolge folgen. Da eine Soll-Reihenfolge bekannt ist, lassen sich Reihenfolgeabweichungen ermitteln. Unterscheiden sich die Sollreihenfolgen an zwei aufeinanderfolgende Prozesse, kann dies zu schwankenden Durchlaufzeiten und Pufferbeständen führen. Eine skizzierte Perlenkette kodiert diese Art der Reihenfolgesteuerung.
- **FIFO:** Folgt die Bearbeitung der Aufträge der FIFO-Reihenfolge, nehmen weder Planung noch Steuerung Reihenfolgeänderungen im Puffer vor. Aufträge werden nach dem Prinzip „First-In-First-Out“ bearbeitet. Dies führt zu Durchlaufzeiten mit geringen

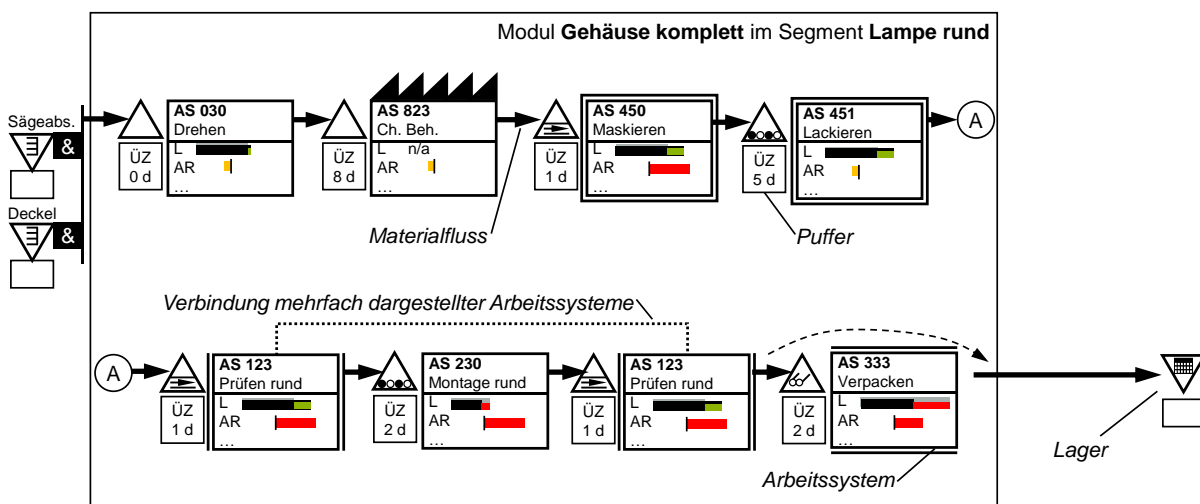
Schwankungen. Das in der Wertstromanalyse geläufige FIFO-Symbol stellt diese Art der Reihenfolgesteuerung dar.

In der ersten Darstellungsstufe kann die vorgenommene Zuordnung der Arbeitssysteme zu Modulen und Segmenten geprüft werden. Die gewichtet dargestellten Verbindungen identifizieren die Hauptmaterialflüsse.

Das dargestellte Beispiel ist typisch für eine wenig konsequente Segmentierung. Lediglich die Montage ist eindeutig dem Modul zugeordnet. Die Materialflüsse sind linear, jedoch werden die Reihenfolgen unterschiedlich gebildet.

### Stufe 2: Kennzahlen

Um die Ursachen für die Dispositionskomplexität detailliert identifizieren und erklären zu können, sind zusätzliche Kennzahlen notwendig. Die in Bild 5.24 dargestellte Stufe zwei erweitert die Wertstromdarstellung daher um diese Kennzahlen.





AS: Arbeitssystem L: Leistung AR: Arbeitsrückstand ÜZ: Übergangszeit Ch. Beh: Chemische Behandlung

**Bild 5.24** Wertstrom – Stufe 2: Kennzahlen (angelehnt an Erlach 2020, S. 406–407)


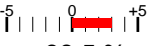
Analog zum Produktnetz sind die Kennzahlen zur Beschreibung von Struktur und Verhalten unterhalb des jeweiligen Arbeitssystems bzw. Puffers in einem Datenkasten aufgeführt. Datenbalken visualisieren die Kennzahlen. (Bild 5.25, vgl. Bild 5.18, Bild 5.19)

## a) Puffer



--	--
# Eingehende Matf.	1 (1; 0; 0; 0)
Bearbeitbarer DB [h]	
Übergangszeit	2 d
...	

## b) Arbeitssystem

AS 230 Montage rund	
<i>Priorisierung</i>	Leistung [S/Wo] 
<i>Struktur</i>	# belieferte Segmente 1 # belieferte Module 1
<i>Zuverlässigkeit</i>	Arbeitsrückstand [h]  Erstausbeute 98,5 %
<i>Geschwindigkeit</i>	Bearbeitungszeit 120 min Rüstzeit 15 min
...	...

Matf.: Materialflüsse DB: Direktbestand

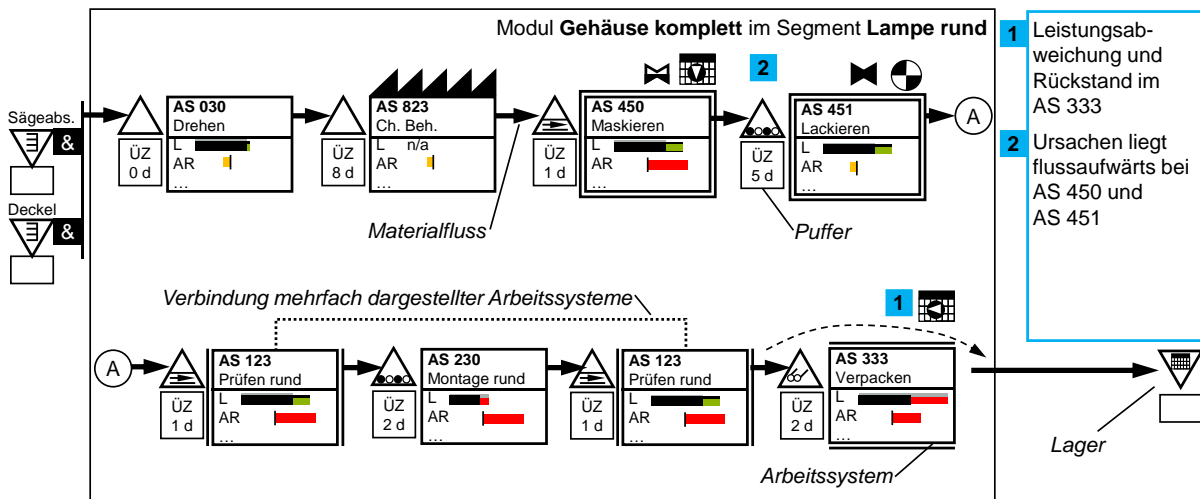
**Bild 5.25** Legende der Datenkästen der Puffer und Arbeitssysteme (Beispiel)

Die Gruppierung der Kennzahlen in den Datenkästen der Puffer (Bild 5.25a) und Arbeitssysteme (Bild 5.25b) erfolgt analog zur Kennzahlengliederung der Module und Lager (vgl. Bild 5.18). Eine detaillierte Beschreibung der Kennzahlen erfolgt in Abschnitt 6.4.

Die Kennzahlen identifizieren Abweichungen vom Soll-Zustand. Im Beispiel fallen insbesondere die hohen Rückstände auf. Teilweise lassen sich diese über die Leistungsabweichungen (z.B. beim Verpacken) begründen.

### Stufe 3: Engpasskennzeichnung

Die Vielzahl an Kennzahlen und Informationen ist notwendig, um das System ausreichend genau zu beschreiben. Analog zum letzten Schritt im Produktnetz erfolgt im Wertstrom im dritten Schritt die Kennzeichnung der Engpässe sowie eine Priorisierung. (Bild 5.26)



AS: Arbeitssystem L: Leistung AR: Arbeitsrückstand ÜZ: Übergangszeit Ch. Beh: Chemische Behandlung

**Bild 5.26** Wertstrom – Stufe 3: Engpasskennzeichnung (angelehnt an Erlach 2020, S. 406–407)

In der Darstellung lassen sich drei Engpassarten aus Ressourcensicht identifizieren. Abhängig vom Kontext sind einzelne Engpässe von besonderer Relevanz:

- *Kapazitätsengpässe*, die mehrere Segmente und Module beliefern, erfordern eine besonders detaillierte Planung und Steuerung. Rückstand an solchen Arbeitssystemen lässt sich schwer abbauen und hat unmittelbare Wirkung auf zahlreiche Subsysteme.
- *Mix-Flexibilitätsengpässe* sind insbesondere in langen Herstellketten bei losweiser Bearbeitung von Relevanz. Die am Engpass notwendigen großen Lose erhöhen die Bestände an allen Arbeitssystemen der Herstellkette und verlängern die Durchlaufzeiten.
- Der Rückstand an *Terminengpässen*, die gleichzeitig Kapazitätsengpässe sind, lässt sich aufgrund der beschränkten Kapazitätsflexibilität nur langsam abbauen. Terminengpässe, die nicht mit Kapazitätsengpässen zusammenfallen, deuten auf eine ungeeignete Kapazitätssteuerung hin.

Die notwendigen Kennzahlen zur Engpassermittlung, lassen sich aufwandsarm in der Regel nur für interne Arbeitssysteme ermitteln. Insbesondere für externe Arbeitssysteme mit langen Durchlaufzeiten kann es dennoch sinnvoll sein, die Kennzahlen erheben zu lassen, um ein vollständiges Bild des Wertstroms zu erhalten.



Der Wertstrom lässt sich durch zusätzliche Informationen, beispielsweise mögliche Verbesserungsmaßnahmen oder nicht aus den Kennzahlen ersichtliche Begründungen, ergänzen. Dies erleichtert die Nachvollziehbarkeit der getroffenen Schlussfolgerungen.

Im Beispiel stellt das Lackieren den Flexibilitäts- sowie den absoluten Kapazitätsengpass dar. Indirekter Terminengpass ist die Verpackung. Die Ursachen liegen wahrscheinlich beim flussaufwärts liegenden Maskieren, da dies sowohl direkter Terminengpass als auch relativer Kapazitätsengpass ist.



# 6 Vorgehen zur Analyse der Dispositionskomplexität

Ziel des Vorgehens ist es, systematisch Struktur und Verhalten des Systems zu prüfen, um möglichst aufwandsarm die relevanten Einflussfaktoren auf die logistische Leistung zu identifizieren. Analyseschwerpunkt bildet die Komplexität der internen Disposition. Zentrale Werkzeuge zur Visualisierung der Analysen sind das im vorhergehenden Kapitel beschriebene Produktnetz und der Wertstrom.

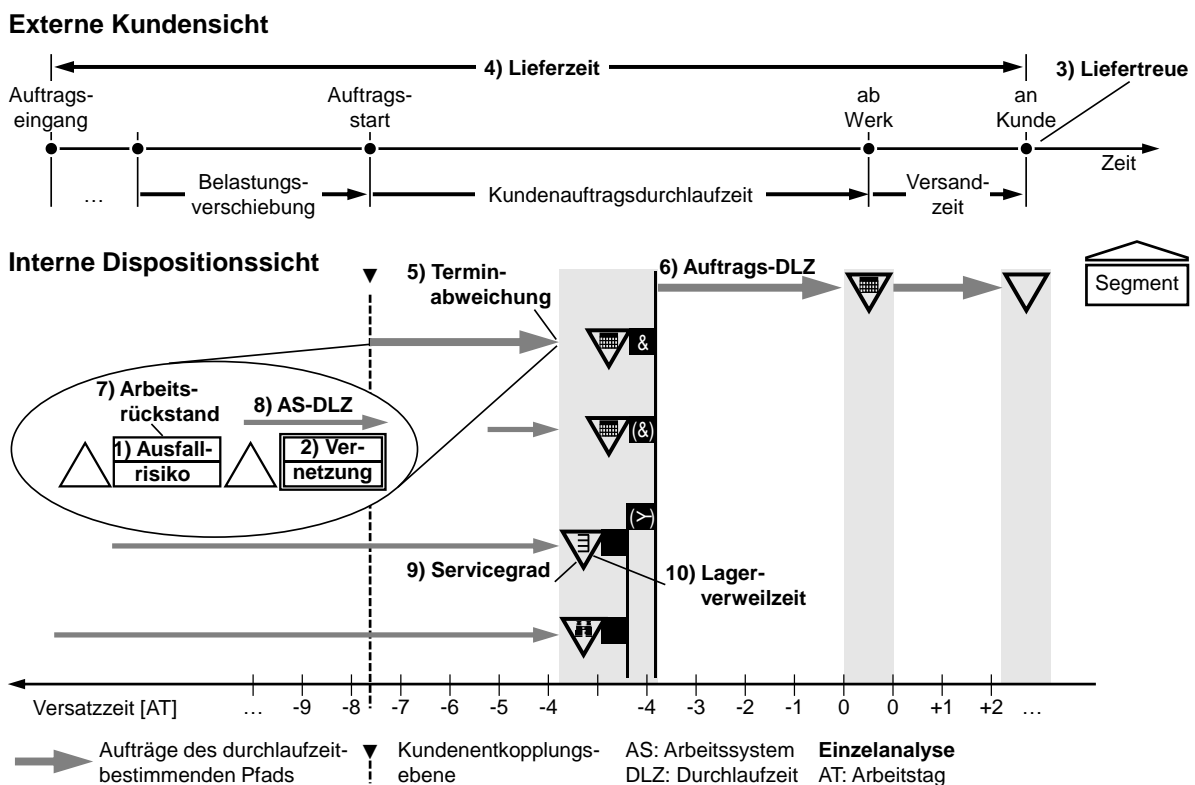
Dieses Kapitel gibt zunächst ein Überblick über das Vorgehen und die Zusammenhänge der einzelnen Analysen. Die folgenden Abschnitte stellen die Einzelanalyse der Untersuchung der Systemstruktur sowie des externen und internen Systemverhaltens detailliert dar. Die Kennzahlenanalyse beschreibt das Vorgehen zur Aufbereitung der in den Analysen verwendeten Kennzahlen. Der abschließende Abschnitt beschreibt die Konsolidierung der Ergebnisse anhand der günstigen Systemeigenschaften.

Vor Beginn der Systemanalyse ist eine qualitative Vorstudie des Auftragsmanagements, der logistischen Rahmenbedingungen und der Stolpersteine nach Wiendahl (2011) hilfreich. Mit dem durch die Vorstudie erlangten Wissen kann die quantitative Analyse effizient durchgeführt werden, beispielsweise durch die Vorauswahl relevanter Bereiche und das Setzen von Schwerpunkten (Wiendahl 2011, Kap. 5). Zudem sollte vorab die Belastungssituation der Produktion geprüft werden, um grundsätzliche Abweichungen zwischen Kapazitätsbedarf und -angebot zu erkennen (Erlach 2020, S. 46–57).

## 6.1 Überblick und Zusammenhänge der Einzelanalysen

Die Gliederung der Einzelanalysen orientiert sich am Ordnungsrahmen der Arbeit. Zunächst gilt es, die Struktur des Systems zu untersuchen. Anschließend erfolgt die Analyse des Verhaltens aus externer Kundensicht sowie interner Dispositionssicht.

Bild 6.1 zeigt die grundlegenden Analysesichten sowie die Zusammenhänge der zehn Einzelanalysen. Die Priorisierung der zu untersuchenden Segmente und Module basiert auf den Logistikkosten: Segmente und Module mit hohen Absätzen bzw. Durchsätzen sowie hohen Beständen sollten bevorzugt untersucht werden. Die Analyse erfolgt iterativ. Kennzahlen sollten nur detailliert untersucht werden, sofern diese Auffälligkeiten aufweisen. Dieses Vorgehen reduziert den Analyseaufwand erheblich.



**Bild 6.1** Zusammenhänge der Einzelanalysen

Ziel der Strukturanalyse ist es, die entwickelte Systemgliederung in Segmente und Module zu untersuchen. Je unabhängiger die zu untersuchenden Subsysteme, desto eindeutiger lassen sich Ursache und Wirkung zuordnen. Die *Strukturanalyse* erfolgt in zwei Einzelanalysen aus Ressourcensicht:

1. Ziel der *Ausfallrisikoanalyse* ist es, Arbeitssysteme zu ermitteln, die eine Gliederung des Systems in unabhängige Subsysteme erschweren oder verhindern.

2. Ziel der *Vernetzungsanalyse* ist es, Arbeitssysteme zu identifizieren, die mehrere Segmente oder Module miteinander verbinden, um gegebenenfalls die Segment- und Modulbildung anzupassen.

Aufbauend auf der Strukturierung in Segmente und Module wird das logistische Verhalten des Systems untersucht. Die *Verhaltensanalyse* orientiert sich an den beiden Dimensionen der Logistikleistung, um zwei Fragen zielgerichtet zu beantworten:

- **Zuverlässigkeit:** Wird die logistische Leistung *zuverlässig*, entsprechend der vereinbarten Toleranzen erbracht?
- **Geschwindigkeit:** Wird die logistische Leistung *schnell*, entsprechend der Geschwindigkeitsanforderungen erbracht?

Zentrale Koordinationsobjekte zwischen Kunde und Produktion bilden die Kundenaufträge. Die Untersuchung der angebotenen Logistikleistung aus *externer Kundensicht* erfolgt daher für zwei Kennzahlen aus Kundenauftragssicht:

3. Die *Liefertreue* beschreibt die zuverlässige Lieferung aus Kundensicht. Sie ist eine der zentralen Messgrößen des Kunden.
4. Die *Lieferzeit* beschreibt die Geschwindigkeit aus Kundensicht. Zentrale Einflussfaktoren der Produktion auf die Lieferzeit sind die Belastungsverschiebung sowie die Produktionsdurchlaufzeit. Letztere wird maßgeblich über die Wahl der Kundenentkopplungsebene beeinflusst.

Die *interne Dispositionssicht* ist Schwerpunkt der Arbeit. Die Untersuchung erfolgt für die drei grundlegenden Klassen jeweils für Abweichungen von der vereinbarten Zuverlässigkeit und der Geschwindigkeit. Aus *Auftragssicht* ergeben sich zwei Einzelanalysen:

5. *Terminabweichungen* quantifizieren die Zuverlässigkeit, mit der Hersteaufträge bearbeitet werden. Geringe Terminabweichungen beeinflussen insbesondere bei bedarfsorientierter Disposition die Liefertreue gegenüber dem Kunden positiv.
6. Die *Auftragsdurchlaufzeit* beschreibt die Geschwindigkeit, mit der Aufträge bearbeitet werden. Kurze Auftragsdurchlaufzeiten reduzieren insbesondere bei bedarfsorientierter Disposition die Lieferzeit.

Aus *Ressourcensicht* werden zwei Einzelanalysen durchgeführt:

7. Der *Arbeitsrückstand* quantifiziert die Zuverlässigkeit der Leistungserbringung von Arbeitssystemen. Geringer Arbeitsrückstand reduziert die Terminabweichungen.
8. Die *Arbeitssystemdurchlaufzeit* beschreibt die Geschwindigkeit, mit der Arbeitssysteme einzelne Arbeitsvorgänge bearbeiten. Eine geringe Arbeitssystemdurchlaufzeit reduziert die Auftragsdurchlaufzeit.

Die Untersuchung aus *Artikelsicht* erfolgt mit zwei weiteren Einzelanalysen:

9. Die Analyse des *Servicegrades* überprüft, ob der notwendige Artikelbestand zuverlässig verfügbar ist. Insbesondere bei prognose- und verbrauchsorientierter Disposition reduzieren hohe Servicegrade die Wahrscheinlichkeit von Fehlteilen.
10. Die *Lagerverweilzeit* beschreibt die Geschwindigkeit des Lagerumschlags für einzelne Artikel. Eine geringe Lagerverweilzeit reduziert in der Regel das Verwurfsrisiko sowie die Bestandskosten.

Die vorgestellte Reihenfolge der Einzelanalysen entspricht der üblichen Analysereihenfolge. Abhängig von den Ergebnissen der qualitativen Vorstudie kann eine alternative Reihenfolge zielführender sein. Die nachfolgenden Abschnitte detaillieren die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sowie die Quantifizierung der Kennzahlen.

## 6.2 Analyse der Systemstruktur

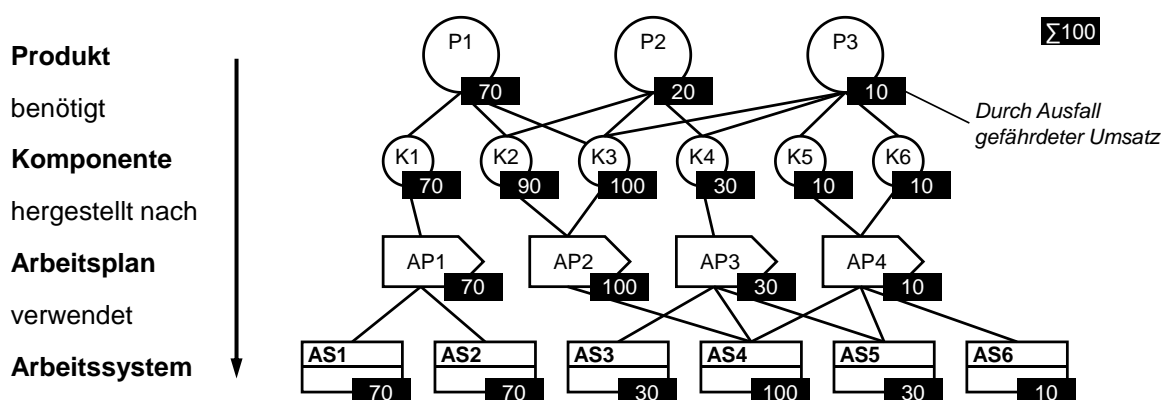
Ziel der Strukturanalyse ist es, kritische und vernetzte Arbeitssysteme zu identifizieren. Der Ausfall kritischer Arbeitssysteme stellt ein hohes Risiko für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems dar. Eine hohe Vernetzung erschwert die unabhängige Planung und Steuerung von Subsystemen. Eindeutig einem Segment oder Modul zugeordnete Arbeitssysteme erleichtern die voneinander unabhängige Herstellung von Produkten und Komponenten.

### 6.2.1 Ausfallrisiko

Ziel der Analyse des Ausfallrisikos ist es, Elemente zu identifizieren, deren Ausfall direkt oder indirekt zahlreiche weitere Elemente des Systems betrifft. Sie können somit die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems gefährden.

Die Ermittlung kritischer Arbeitssysteme erfolgt anhand folgender Grundüberlegung: Produkte bestehen aus Komponenten, zu deren Herstellung Arbeitspläne, koordiniert über Aufträge, ausgeführt werden müssen. Arbeitssysteme führen diese Aufträge aus. Fällt ein solches Arbeitssystem aus, können die Komponenten nicht hergestellt werden, was zu Fehlteilen und somit nicht lieferbaren Produkten führen kann.

Zentrale Datengrundlage der Analyse bilden Umsätze, Stücklisten sowie Standardarbeitspläne der einzelnen Produkte. Die Gewichtung eines möglichen Ausfalls erfolgt anhand des durch den Ausfall gefährdeten Umsatzes innerhalb der Analyseperiode. Bild 6.2 zeigt das Vorgehen an einem Beispiel exemplarisch: Drei Produkte erzielen einen Gesamtumsatz von 100 GE. Ein Ausfall von Komponente K3 birgt aufgrund der Mehrfachverwendung das höchste Risiko für den Gesamtumsatz. Für die Produktion der Komponente K3 benötigt der Arbeitsplan AP2 das verknüpfte Arbeitssystem AS4. Der Ausfall des AS4 birgt damit das höchste Risiko für den Gesamtumsatz.



**Bild 6.2** Quantifizierung des Ausfallrisikos

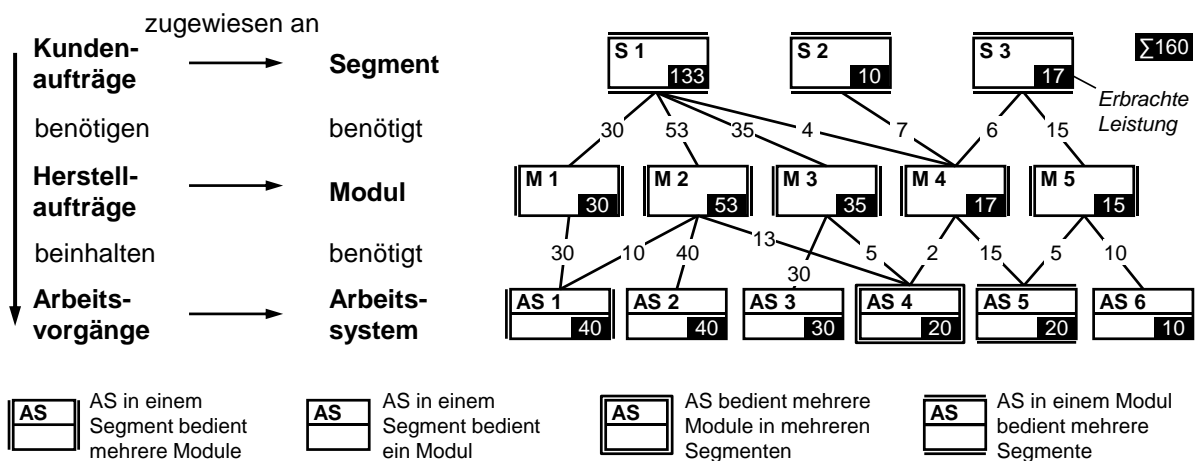
Aufgrund des potenziell hohen Risikos sollte das Verhalten und eine mögliche Entkopplung kritischer Arbeitssysteme, z.B. durch alternative oder redundante Arbeitssysteme, im Verlauf der Analyse weiter geprüft werden.

## 6.2.2 Vernetzung

Ziel der Analyse ist die Identifikation vernetzter Arbeitssystemen, die mehreren Segmenten und Modulen versorgen. Solche Arbeitssysteme erschweren die Analyse und den unabhängigen Betrieb des Systems. Das hier verwendete Vorgehen basiert auf den Überlegungen von Wiendahl (2011, S. 287–290) zur logistischen Bilanzhülle und erweitert diese um eine zweistufige Darstellung.

Bild 6.3 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung der Vernetzung. Das Vorgehen ist angelehnt an die Ermittlung des Ausfallrisikos: Kundenaufträge (bzw. Auftragspositionen) sind Segmenten zugeordnet. Zur Erfüllung der Kundenaufträge müssen Hersteleaufträge ausgeführt werden. Diese wiederum sind einzelnen Modulen zugeordnet. Zur Erfüllung der Hersteleaufträge wird, koordiniert über Arbeitsvorgänge, Leistung auf Arbeitssystemen erbracht. Die erbrachte Leistung lässt sich wiederum den einzelnen Modulen und Segmenten zuordnen.

Zentrale Datengrundlage der Analyse sind Kunden- und Hersteleaufträge. Je nach eingesetztem ERP-System kann die eindeutige Verbindung zwischen Kunden- und Hersteleaufträgen verloren gehen. Dies erhöht den Aufwand zur Ermittlung der Beziehungen zwischen Segmenten und Modulen.



**Bild 6.3** Quantifizierung der Vernetzung der Arbeitssysteme

Im Beispiel erbringt Arbeitssystem AS4 eine Leistung von 20 ZE (Zeiteinheiten). Davon sind 13 ZE Modul M2, 5 ZE Modul M3 und 2 ZE Modul M4 zugeordnet. Die Module M1, M2



und M3 sind eindeutig Segment S1 zugeordnet. Modul M4 hingegen ist allen Segmenten zugeordnet.

Anhand der in Bild 6.3 dargestellten Vernetzung lässt sich abschätzen, wie sich möglichst unabhängige Segmente und Module bilden lassen. Zudem lassen sich Arbeitssysteme ermitteln, die unabhängig von der gewählten Strukturierung eine hohe Vernetzung besitzen. Der Rahmen des Arbeitssystems stellt die Art der Vernetzung dar (vgl. Bild 5.22).

Bei Arbeitssystemen mit eindeutiger Zuordnung ist die Vernetzung leicht nachvollziehbar. Häufig erfolgt eine solch eindeutige Zuordnung auf Kosten einer geringeren Auslastung. Vernetzte Arbeitssysteme, die sowohl mehreren Segmenten als auch Modulen zugewiesen sind, müssen häufig hohe Anforderungen erfüllen. Die Anzahl der zu bearbeitenden Artikelvarianten ist in der Regel höher. Dies erhöht meist die Rüstaufwände. Zudem bilden vernetzte Arbeitssysteme häufig Knoten innerhalb der Produktion und erschweren dadurch die Gestaltung linearer Materialflüsse.

## 6.3 Analyse des Systemverhaltens aus Kundensicht

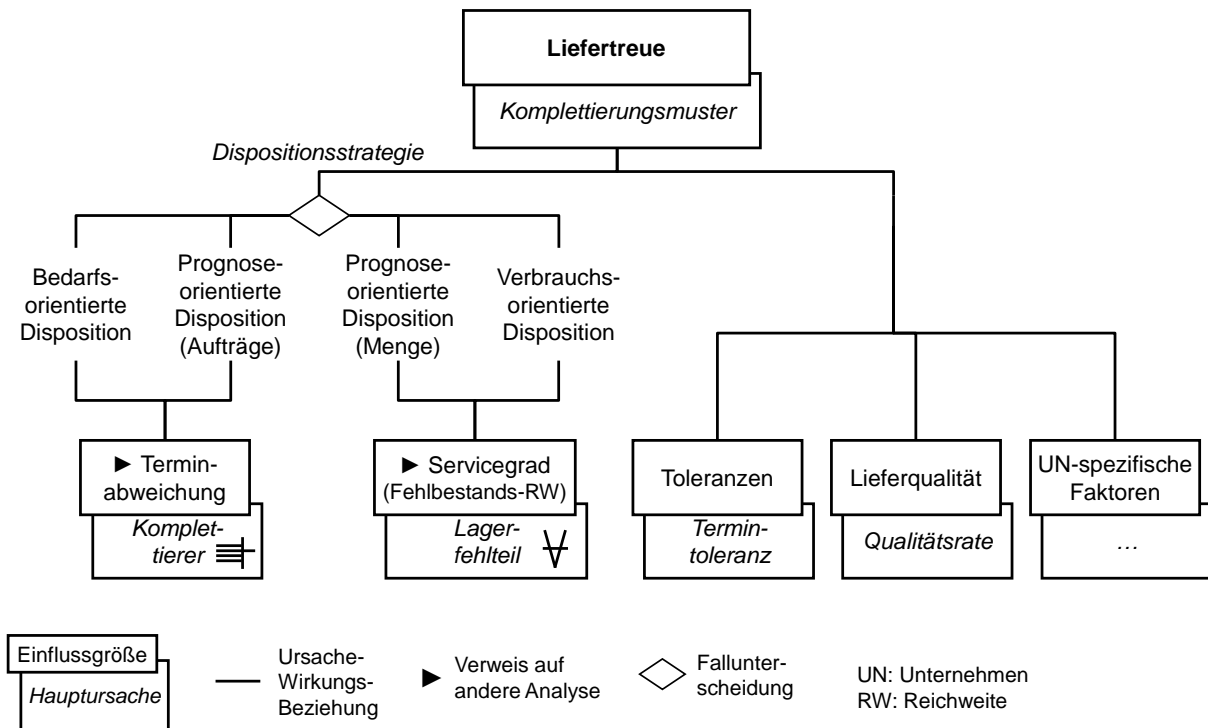
Ziel der Analyse des Systemverhaltens aus Kundensicht ist es, zu prüfen, ob das System die vom Kunden geforderte logistische Leistung grundsätzlich erfüllt. Nur dann ist eine detailliertere Analyse aus Dispositionssicht sinnvoll.

Diese Analyse prüft Liefertreue und Lieferzeit. Die Erhebung und exakte Ermittlung der Kennzahlen stellt hohe Anforderungen an die bestehenden Daten:

- Idealerweise erfolgt die Ermittlung der Liefertreue aus Kundensicht unter Berücksichtigung der für den Kunden relevanten Kennzahlendefinition. Eine geeignete Ermittlung der Liefertreue sollte daher die spezifischen Kriterien bezüglich Berechnungslogik, Umfang und Präzision der Messung für jeden Kunden individuell berücksichtigen.
- Um die logistischen Leistungsanforderungen aus Kundensicht zu ermitteln, ist zudem die Wunschlieferzeit des Kunden zu dokumentieren. Gängige System erfassen allerdings häufig nur die vereinbarte Lieferzeit und nicht die Wunschlieferzeit. Zudem ist die Datenqualität zu prüfen (Wiendahl 2011, S. 224).

### 6.3.1 Liefertreue

Die *Liefertreue* (auch Lieferzuverlässigkeit) beschreibt die pünktliche Lieferung der über den Kundenauftrag vereinbarten Artikel in der richtigen Menge zum richtigen Ort. Schwerpunkt der Betrachtung in dieser Arbeit bildet die pünktliche Lieferung. Werden in der Lagerfertigung die Standardlieferzeiten übernommen, entspricht die Liefertreue dem Servicegrad.



**Bild 6.4** Relevante Einflussgrößen der Liefertreue

Bild 6.4 zeigt die zentralen Einflussgrößen auf die Liefertreue. Zunächst sollten die sich aus der Produktstruktur ergebenden, teils komplizierten, Komplettierungsmuster untersucht werden, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Liefertreue haben.

Die Liefertreue hängt von der internen Zuverlässigkeit der liefernden Läger ab. Abhängig von der Dispositionsstrategie lässt sich die Zuverlässigkeit auf zwei Arten ermitteln:

- Für Läger mit bedarfs- oder prognoseorientierter Disposition von *Einzelbedarfen* wird die Zuverlässigkeit über die Terminabweichung der zuliefernden Aufträge ermittelt. Die Priorisierung der zu untersuchenden Läger erfolgt anhand des Komplettierers.

- Für Läger mit prognoseorientierter Disposition von *Gesamtmen*gen (pro Periode) sowie verbrauchsorientierter Disposition erfolgt die Ermittlung der Zuverlässigkeit über den (periodenbezogenen) Servicegrad. Die Priorisierung erfolgt anhand der Lagerfehlteile.

Je geringer die Toleranzen, beispielsweise das Lieferterminfenster, desto schwieriger ist es, eine hohe Liefertreue zu erreichen. Neben der pünktlichen Lieferung ist die Lieferung in der vereinbarten Produktqualität, beispielsweise gemessen als Anteil der vom Kunden akzeptierten Lieferungen, von hoher Relevanz.

Zudem beeinflussen unternehmensspezifische Faktoren die Liefertreue. Hierzu zählen insbesondere spezielle Vereinbarungen bezüglich Art, Menge, Termin und Ort.

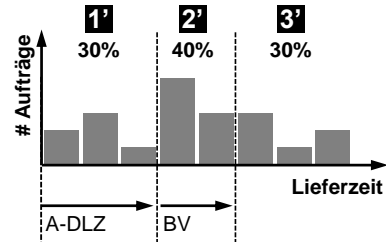
### **6.3.2 Lieferzeit**

Vor der detaillierten Analyse der Lieferzeiten ist zu prüfen, inwieweit diese mit den Kundenwünschen übereinstimmen. Stimmt die zugesagte Lieferzeit mit der Wunschlieferzeit der Kunden überein, erfüllt das Produktionssystem die logistischen Lieferzeitanforderungen aus externer Kundensicht grundsätzlich.

Bild 6.5 zeigt das Vorgehen zur Prüfung der Wunsch- und Solllieferzeiten. Die Analyse erfolgt in drei Schritten.

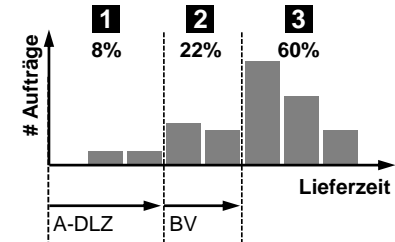
**Wunsch-Lieferzeiten**

Anteil der Anfragen in der Kategorie ...



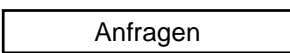
**Vereinbarte Soll-Lieferzeiten**

Anteil der Aufträge in der Kategorie ...



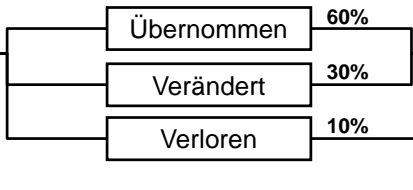
A-DLZ: Auftragsdurchlaufzeit BV: min. Belastungsverschiebung

**a) Anfrageart**

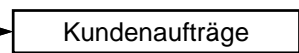


- 1<sup>1</sup> Eilanfrage
- 2<sup>1</sup> Überholanfrage
- 3<sup>1</sup> Standardanfrage

**b) Verhandlungsergebnis**



**c) Auftragsart**



- 1<sup>1</sup> Eilaufträge
- 2<sup>1</sup> Überholaufträge
- 3<sup>1</sup> Standardaufträge

**Bild 6.5** Kategorisierung der Wunsch- und Soll-Lieferzeiten

Im ersten Schritt werden die (ungefilterten) Kundenanfragen anhand der Wunsch-Lieferzeit (Zeit zwischen Anfrage- und gewünschtem Lieferzeitpunkt) in drei Kategorien unterteilt (Bild 6.5a):

- Die Wunschlieferzeiten der *Eilanfragen* sind kürzer als die Standardauftragsdurchlaufzeiten.
- *Überholanfragen* fordern Lieferzeiten, die aufgrund der aktuellen Belastungsverschiebung innerhalb der Auftragsbestandsreichweite liegen.
- *Standardanfragen* fordern Lieferzeiten, die länger als die aktuelle Auftragsbestandsreichweite (Belastungsverschiebung) plus der Auftragsdurchlaufzeiten sind.

Der Vertrieb verhandelt die Anfragen mit den Kunden. Dabei sind drei Ergebnisse hinsichtlich der zugesagten Lieferzeit möglich (Bild 6.5b):

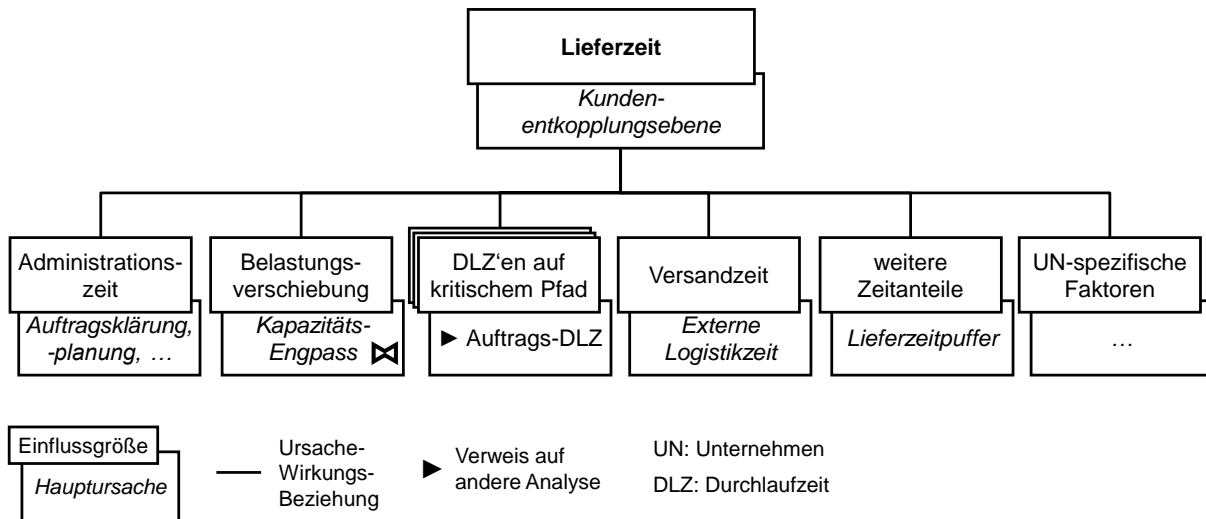
- Die Wunschlieferzeit der Anfrage wird ohne Änderungen übernommen.
- Es wird eine in der Regel längere Lieferzeit zugesagt.
- Lässt sich keine Einigung hinsichtlich der Lieferzeit erzielen, ist die Verhandlung gescheitert und die Anfrage verloren.

Die übernommenen und geänderten Anfragen werden in Kundenaufträge umgewandelt. Analog zu den Anfragen lassen sich diese Aufträge in die drei beschriebenen Kategorien einteilen (Bild 6.5c):

- *Eilaufträge* verursachen häufig Turbulenzen in Form von Reihenfolgevertauschungen oder Unterbrechen laufender Aufträge. Kürzere Durchlaufzeiten könnten die Auftrittswahrscheinlichkeit von Eilaufträgen reduzieren.
- *Überholaufträge* verursachen regelmäßig Rückstand aufgrund der Überplanung der Arbeitssystemkapazitäten. Sie bringen damit die Termintreue *aller Aufträge* in Gefahr. Eine Verschiebung bereits zugesagter Liefertermine führt zu erneuten Kundenverhandlungen. Eine Reduzierung der Belastungsverschiebung kann den Anteil an Überholaufträgen verringern. Bei geringerer Belastungsverschiebung wird ein Teil der Überholaufträge zu Standardaufträgen.
- *Standardaufträge* sollten keine lieferzeitinduzierten Turbulenzen verursachen.

Die prozentuale Verteilung der Auftragsarten gibt einen Hinweis auf die Schwerpunkte der nachfolgenden Analysen. Insbesondere ein hoher Anteil an verlorenen Aufträgen stellt die grundsätzliche logistische Leistungsfähigkeit des Systems in Frage.

Die *Lieferzeit* ist die Zeit zwischen Eingang der Kundenbestellung bis zur vollständigen Lieferung an den Kunden. Aus Dispositionssicht hängt die Lieferzeit insbesondere von der Wahl der Kundenentkopplungsebene ab.



**Bild 6.6** Relevante Einflussgrößen der Lieferzeit

Bild 6.6 zeigt die Zeitanteile der Lieferzeit. Die Administrationszeit ist notwendig zur Auftragsklärung und -planung. Die Belastungsverschiebung hängt in der Regel vom Kapazitätsengpass der Produktion ab. Die Produktionsdurchlaufzeit setzt sich aus den Durchlaufzeiten der Aufträge auf dem kritischen Pfad zusammen. Haupteinflussgröße der Versandzeit ist die externe Logistikzeit. Zu den weiteren Zeitanteilen zählt der Lieferzeitpuffer. Dieser ermöglicht eine hohe externe Liefertreue bei unzuverlässigen internen Prozessen zu Lasten einer längeren Lieferzeit. Zu den unternehmensspezifischen Faktoren zählen weitere Zeitanteile wie beispielsweise Regelungen zur Priorisierung von Aufträgen oder besondere Qualitätsanforderungen.

In der Lagerfertigung ist die Lieferzeit in der Regel konstant. Belastungsverschiebung und die Durchlaufzeiten auf dem kritischen Pfad nehmen eine untergeordnete Rolle ein. (Löd- ding 2016, S. 22)

## 6.4 Analyse des Systemverhaltens aus Dispositionssicht

Ziel der Analyse ist es, das Systemverhalten aus Dispositionssicht zu prüfen und Ursachen für Abweichungen von der geforderten Logistikleistung zu identifizieren.

Die Auswahl und Priorisierung der eingesetzten Einzelanalysen hängt von der vorherrschenden Synchronisation im Produktionssystem ab:

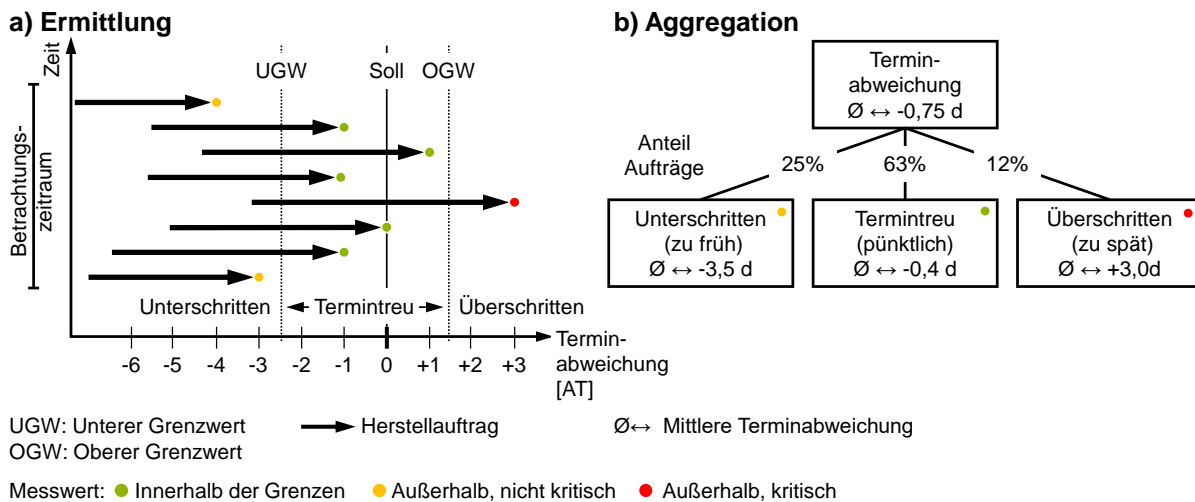
- **Terminsynchronisation:** Bei bedarfsorientierter Disposition oder prognoseorientierter Disposition von Aufträgen stehen die auftragsbezogenen Analysen der Terminabweichung und der Auftragsdurchlaufzeit im Vordergrund.
- **Mengensynchronisation:** Bei verbrauchsorientierter Disposition oder prognoseorientierter Disposition von Mengen stehen die artikelbezogenen Analysen des Servicegrades und der Lagerverweilzeit im Vordergrund.

In beiden Fällen untersuchen arbeitssystembezogene Analysen des Rückstands und der Arbeitssystemdurchlaufzeit die Ursachen der Abweichungen detaillierter. Die Einzelanalysen greifen auf unterschiedliche Datenquellen zu:

- Die Auftragsdaten zur Bestimmung von Terminabweichung und Auftragsdurchlaufzeit sowie die Standardkapazitäten der Arbeitssysteme sollten direkt im ERP-System verfügbar sein.
- Die arbeitsgangbezogenen Durchlaufzeiten und Daten zum exakten Leistungsangebot pro Arbeitstag sowie der exakt erbrachten Leistung werden oft in separaten Systemen (APS, MES) gepflegt.
- Periodenbezogene Servicegrade lassen sich in der Regel direkt über das ERP-System ermitteln. Die Ermittlung der Lagerverweilzeiten erfordert in der Regel den Einsatz von Systemen zur Chargen- oder Einzelstücknachverfolgung.

#### 6.4.1 Terminabweichung

Die *Terminabweichung* beschreibt den Unterschied zwischen Soll- und Ist-Termin eines Auftrags (vgl. Bild 2.7). Die Quantifizierung erfolgt wie in Bild 6.7 dargestellt.



**Bild 6.7** Quantifizierung der Terminabweichung

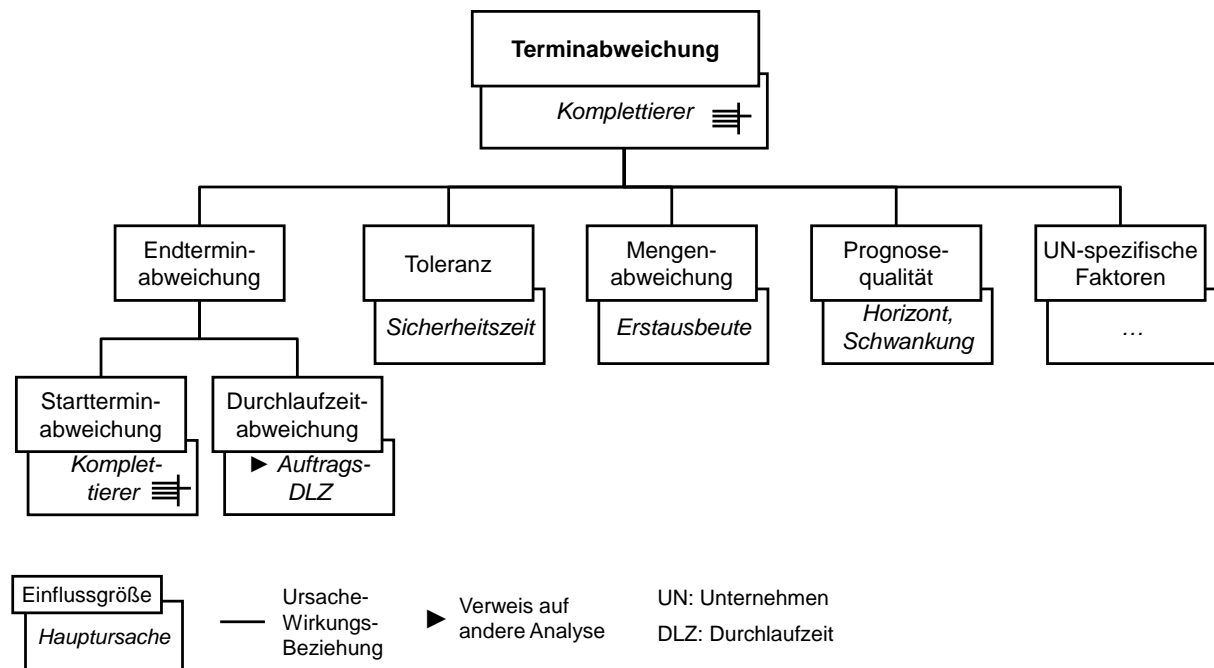
Zunächst werden drei Klassen der Terminabweichung festgelegt und über Farben gekennzeichnet. Geringe Terminabweichungen innerhalb der Grenzwerte (Termintoleranz) sind nicht kritisch (grün). In der Regel ist eine Terminüberschreitung (rot) kritischer als eine Terminunterschreitung (gelb). Jeder Auftrag wird einer der drei Klassen zugeordnet. (Bild 6.7a) Die Grenzwerte sollten aus den Toleranzvorgaben des Kunden abgeleitet werden (Wiendahl 2011, S. 3).

Aggregiert über mehrere Aufträge innerhalb eines Betrachtungszeitraum lassen sich zwei Kennzahlen ermitteln (Bild 6.7b):

- Der *Anteil* der Aufträge in der jeweiligen Klasse gibt die Häufigkeit der Terminabweichung an. Je weniger Aufträge zu früh bzw. zu spät sind, desto höher die Zuverlässigkeit des Systems.
- Der *Mittelwert* der Terminabweichung in der jeweiligen Klasse zeigt die Auswirkung der Abweichung. Geringe mittlere Terminabweichungen der verspäteten Aufträge sind einfacher zu kompensieren als hohe mittlere Abweichungen.

Bild 6.8 zeigt die Ursachen der Terminabweichung. Zunächst sollten die Terminabweichungen der Komplettierer detailliert untersucht werden, da diese die größten Auswirkungen auf die Startterminabweichungen der nachfolgenden Prozesse haben.





**Bild 6.8** Relevante Einflussgrößen der Terminabweichung (Einzelauftrag)

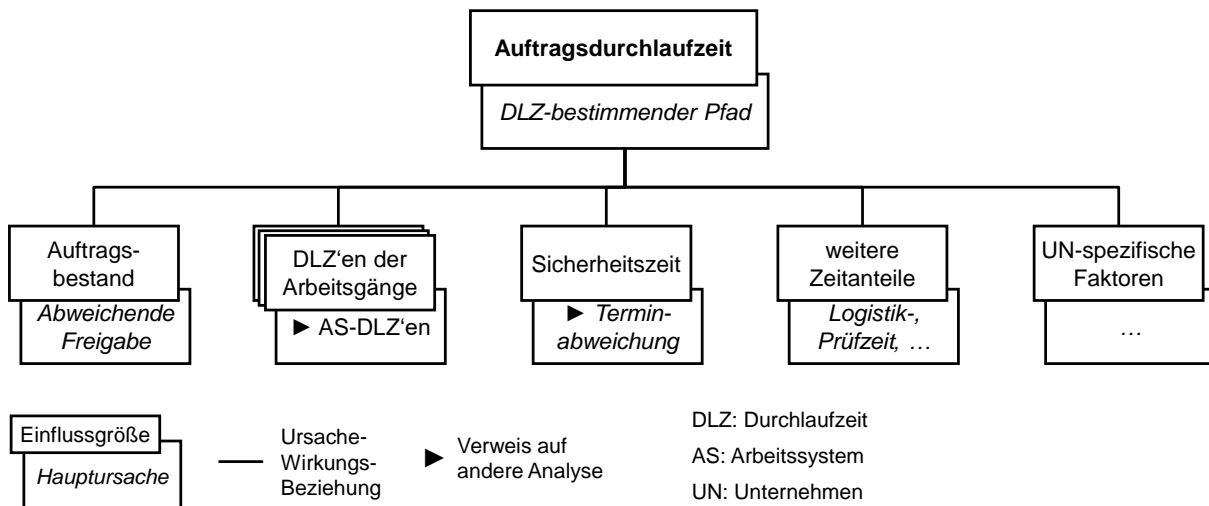
Die Endterminabweichung hat unmittelbaren Einfluss auf die Terminabweichung des Auftrags und kann zwei Ursachengruppen zugeordnet werden: Fehlende Komplettierer verursachen in der Regel Startterminabweichungen des untersuchten Auftrags. Abweichungen der Auftragsdurchlaufzeiten verursachen in der Regel Durchlaufzeitabweichungen, welche der Abschnitt 6.4.2 detailliert.

Hohe Toleranzen, häufig in Form von Sicherheitszeiten, reduzieren die Auswirkungen der Terminabweichungen, gehen jedoch zu Lasten längerer Durchlaufzeiten. Mengenabweichungen führen häufig aufgrund von Nacharbeit und Ausschuss zu fehlenden Komplettierern. Insbesondere bei prognoseorientierter Auftragsdisposition mit langen Prognosehorizonten und starken Schwankungen führt eine geringe Prognosequalität zu Terminabweichungen. Je höher die Erstausbeute, desto geringer der Einfluss der Mengenabweichung. Zu den unternehmensspezifischen Faktoren zählen beispielsweise die Buchungsgenauigkeit und -frequenz.

### 6.4.2 Auftragsdurchlaufzeit

Die *Auftragsdurchlaufzeit* beschreibt die Zeit vom Auftragsstart bis zum Abschluss des Auftrags. Sie ist die zentrale Geschwindigkeitsmesszahl einer Produktion (Erlach 2020,

S. 13). Zunächst sollten die Durchlaufzeiten auf dem die Durchlaufzeit bestimmenden Pfad untersucht werden, da diese unmittelbare auf die minimale Lieferzeit wirken.

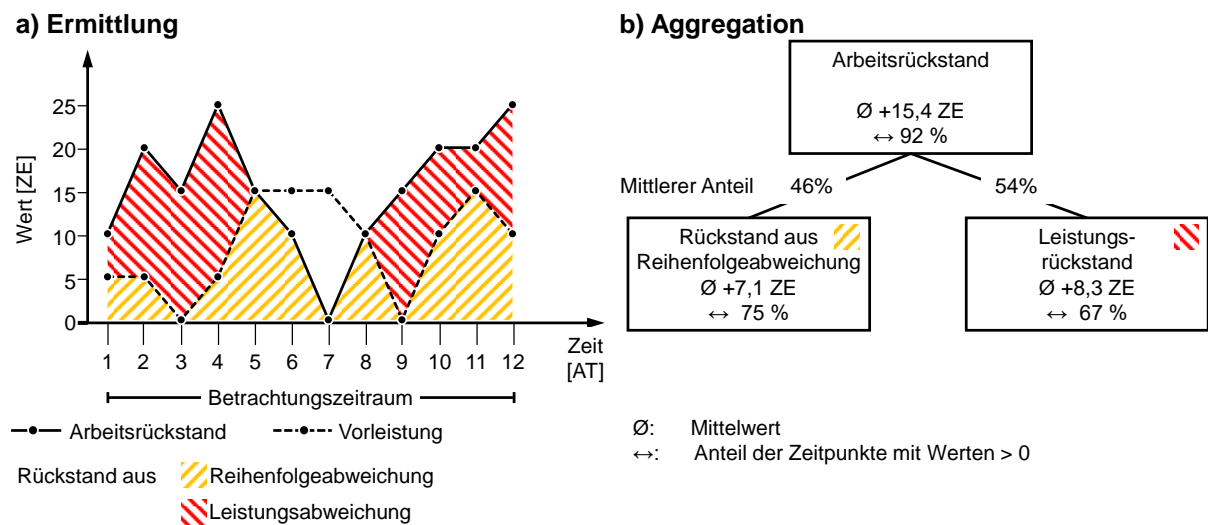


**Bild 6.9** Relevante Einflussgrößen der Auftragsdurchlaufzeit

Bild 6.9 zeigt die Zeitanteile der Auftragsdurchlaufzeit. Insbesondere bei bestandsregelnden Fertigungssteuerungsverfahren kommt dem Bestand, bzw. der Bestandsreichweite von nicht freigegebenen Aufträgen hohe Bedeutung zu. Zentrales Element der Auftragsdurchlaufzeit ist die Summe der Arbeitssystemdurchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsgänge. Die Sicherheitszeit verlängert die Durchlaufzeit. Sie wird in der Regel für Aufträge außerhalb des durchlaufzeitbestimmenden Pfads eingesetzt, um deren Terminabweichung zu reduzieren. Zu den weiteren Zeitanteilen zählen unter anderem Logistik- und Prüfzeiten. Zu den unternehmensspezifischen Faktoren zählen insbesondere Überlappungs- oder Teilungsregelungen für die Auftragsbearbeitung.

### 6.4.3 Arbeitsrückstand

Der Arbeitsrückstand beschreibt die Summe der offenen, überfälligen Aufträge. Aufbauend auf die Überlegungen in Abschnitt 3.2.3 zeigt Bild 6.10 die Quantifizierung des Arbeitsrückstands für ein Arbeitssystem.



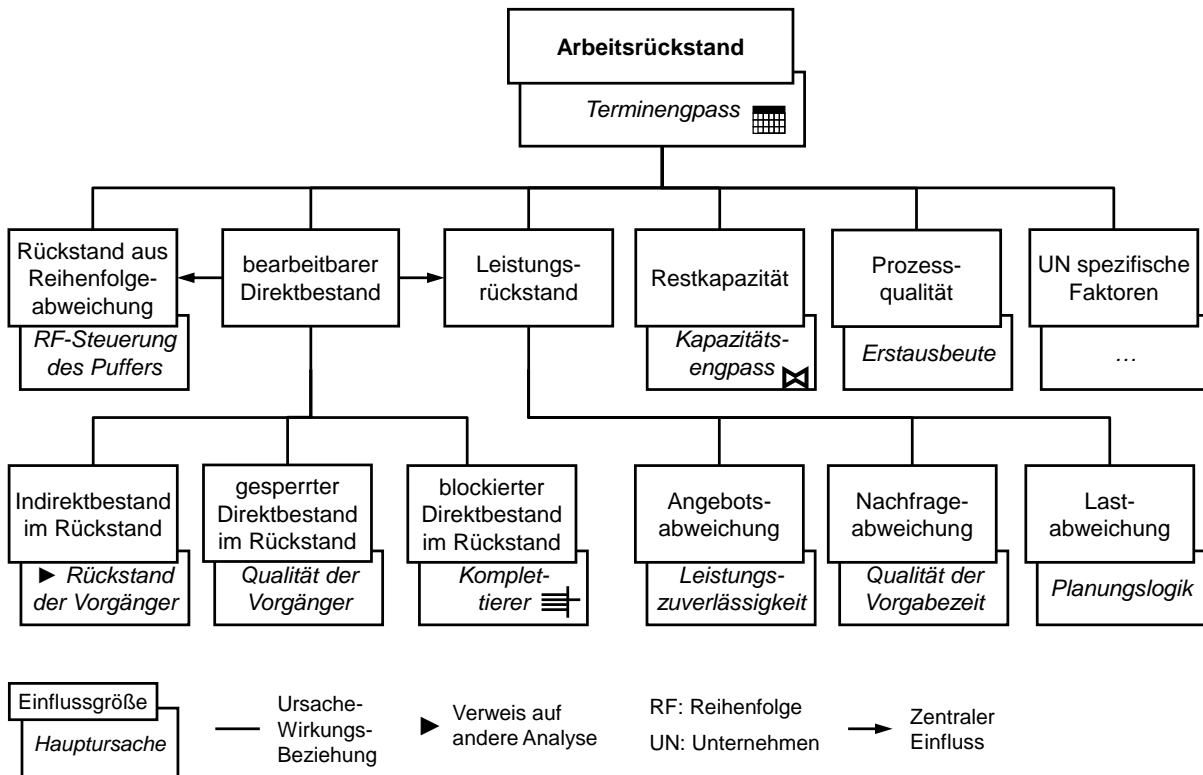
**Bild 6.10** Quantifizierung des Arbeitsrückstands

Das Diagramm zeigt den Arbeitsrückstand zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Wie in Abs. 3.2.3 beschrieben, lassen sich durch Ergänzung der Vorleistung die zwei Hauptursachen für Arbeitsrückstand ermitteln: Das Minimum aus Arbeitsrückstand und Vorleistung beschreibt den Rückstand aus Reihenfolgeabweichung (gelb schraffiert). Die Differenz zwischen Arbeitsrückstand und Rückstand aus Reihenfolgeabweichung entspricht dem Leistungsrückstand (rot schraffiert). Die Ermittlung des Rückstands erfolgt üblicherweise zu festgelegten Zeitpunkten, beispielsweise täglich (Bild 6.10a). Die Grenzwerte des Rückstands sollten aus den Toleranzvorgaben des Kunden anhand der zulässigen Rückstandsreichweiten abgeleitet werden (Wiendahl 2011, S. 3).

Aggregiert über mehrere Perioden innerhalb eines Betrachtungszeitraum lassen sich zwei Kennzahlen ermitteln (Bild 6.10b):

- Der *Mittelwert* des Rückstands zeigt den Beitrag der jeweiligen Ursache zur Gesamtabweichung. Geringere Rückstände sind einfacher zu kompensieren als hohe Rückstände.
- Der *Anteil* der Zeitpunkte mit Werten größer null zeigt die Häufigkeit der Abweichungen an. Je höher der Anteil, desto häufiger trägt die jeweilige Rückstandsursache zu Arbeitsrückstand bei.

Bild 6.11 zeigt die Ursachen für Arbeitsrückstand detaillierter. Zunächst sollte dieser für Terminengpässe detailliert untersucht werden. Die Ursachengliederung ist angelehnt an Ungern-Sternberg et al. (2020a).



**Bild 6.11** Relevante Einflussgrößen des Arbeitsrückstands (Arbeitssystem)

Insbesondere bei hohem Rückstand aus Reihenfolgeabweichung sollten die Reihenfolgebildung am Arbeitssystem detailliert untersucht werden. Die verwendete Reihenfolgesteuerung des Puffers kann Hinweise auf Abweichungsursachen geben.

Steht kein bearbeitbarer Direktbestand zur Verfügung, kann das Arbeitssystem die geforderten Aufträge nicht bearbeiten und somit möglichen Rückstand nicht abbauen. Die Ursachen sind in drei Gruppen unterteilbar: Indirektbestand im Rückstand deutet auf Rückstand in einem vorhergehenden Arbeitssystem hin. Gesperrter Direktbestand im Rückstand deutet auf Qualitätsprobleme an den vorhergehenden Arbeitssystemen hin. Ursache für blockierten Direktbestand im Rückstand sind in der Regel fehlende Kompletierer.

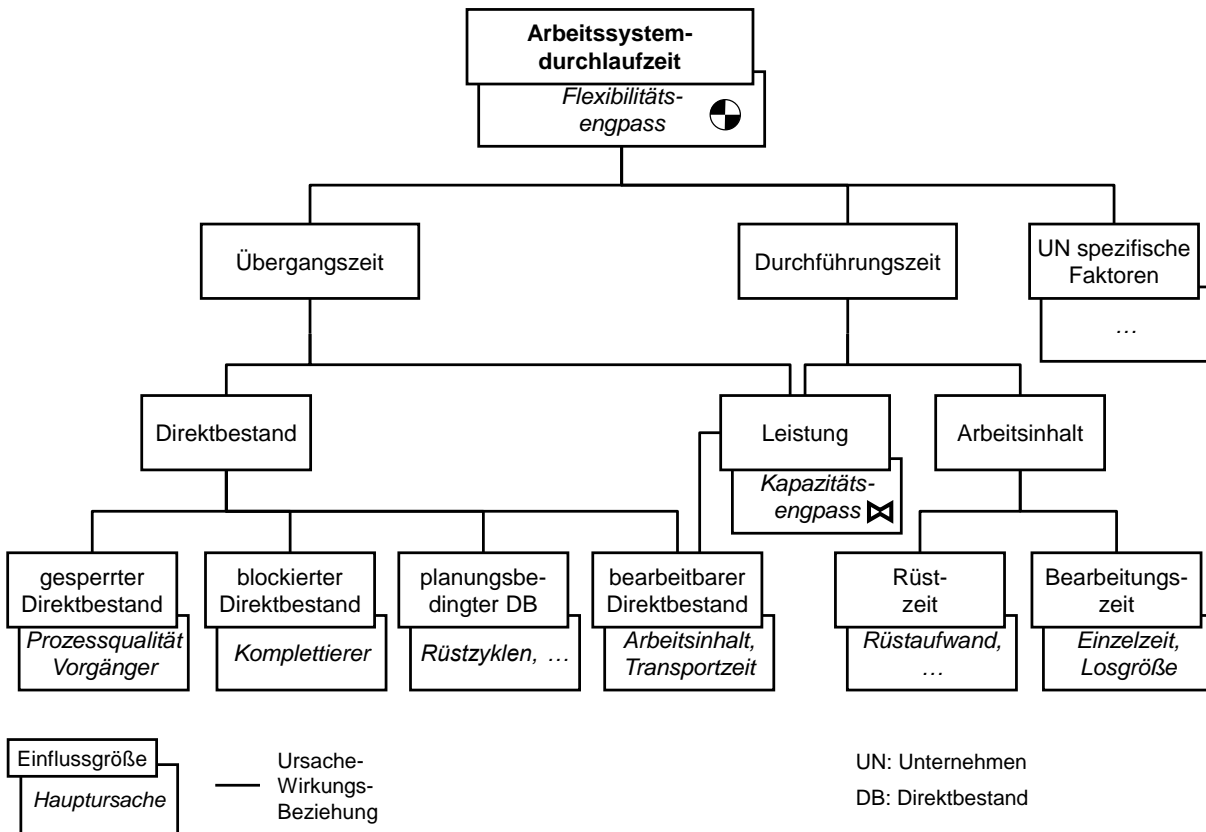
Die Ursachen für Leistungsrückstand lassen sich in vier Gruppen unterteilen: Ohne bearbeitbaren Direktbestand kann die Leistung nicht erbracht werden. Störungen und Ausfälle

führen zu Abweichungen der angebotenen Leistung. Unpräzise Vorgabezeiten führen zu Abweichungen in der nachgefragten Leistung. Insbesondere bei Planungen ohne Kapazitätsrestriktionen verursachen Kapazitätsüberplanungen häufig Rückstand.

Eine hohe Restkapazität trägt zur effektiven Rückstandsregelung bei. Aufgrund der fehlenden Restkapazität ist die Rückstandsregelung bei Kapazitätsengpässen in der Regel schwieriger als bei Arbeitssystemen mit hoher Restkapazität. Eine hohe Prozessqualität und die damit verbundene hohe Erstaussbeute (engl. first pass yield) reduziert den Rückstandsanteil aufgrund von Nacharbeit und Ausschuss. Unternehmensspezifische Faktoren für Rückstand sind beispielsweise die Vorgaben zu Buchungsfrequenzen (z.B. Buchung erst am Tagesende).

#### **6.4.4 Arbeitssystemdurchlaufzeit**

Die *Arbeitssystemdurchlaufzeit* beschreibt die Zeit vom Zugang eines Arbeitsgangs (als Teil eines Auftrags) an einem Arbeitssystem bis zum Abgang vom betrachteten Arbeitssystem. Die Durchlaufzeiten sollten zunächst für die Flexibilitätsengpässe untersucht werden. Häufig geben die Flexibilitätsengpässe die Losgrößen und damit zum Teil die Durchlaufzeit für alle Arbeitssysteme der Herstellkette vor. Bild 6.12 zeigt die Zeitanteile der Arbeitssystemdurchlaufzeit.



**Bild 6.12** Relevante Einflussgrößen der Arbeitssystemdurchlaufzeit

Die Übergangszeit beschreibt die Wartezeit des Bestands auf Bearbeitung. Sie ist abhängig von der Höhe des Direktbestands sowie der Leistung des Arbeitssystems. Insbesondere an Kapazitätsengpässen lässt sich die Leistung in der Regel nicht beliebig erhöhen. Der Direktbestand setzt sich aus vier Teilen zusammen:

- Der gesperrte Direktbestand umfasst Aufträge, die aufgrund von Qualitätsproblemen an vorhergehenden Herstellschritten nicht bearbeitet werden können.
- Der blockierte Direktbestand beinhaltet Aufträge, die auf eine logistische Freigabe zur Bearbeitung warten. Ursachen dafür sind in der Regel Komplettierer.
- Der planungsbedingte Direktbestand beinhaltet Aufträge, die auf ein geeignetes Zeitfenster zur Bearbeitung warten. Solche Bestände sind notwendig, um beispielsweise unterschiedliche Rüstzyklen zwischen zwei Arbeitssystemen zeitlich zu überbrücken.
- Der bearbeitbare Direktbestand steht dem Arbeitssystem zur unmittelbaren Bearbeitung zur Verfügung. Die mögliche Leistung eines Arbeitssystems hängt von der Höhe

des bearbeitbaren Direktbestands ab (vgl. idealer Mindestbestand in Nyhuis et al. 2012, S. 63)

Die Durchführungszeit beschreibt die notwendige Zeit zur Bearbeitung des Auftrags. Sie hängt von der Leistung des Arbeitssystems sowie den beiden Komponenten des Arbeitsinhalts ab: Die Rüstzeit hängt unter anderem vom Rüstaufwand und der verwendeten Kampagnensteuerung ab. Die Bearbeitungszeit ist abhängig von den Einzelzeiten sowie der Losgröße.

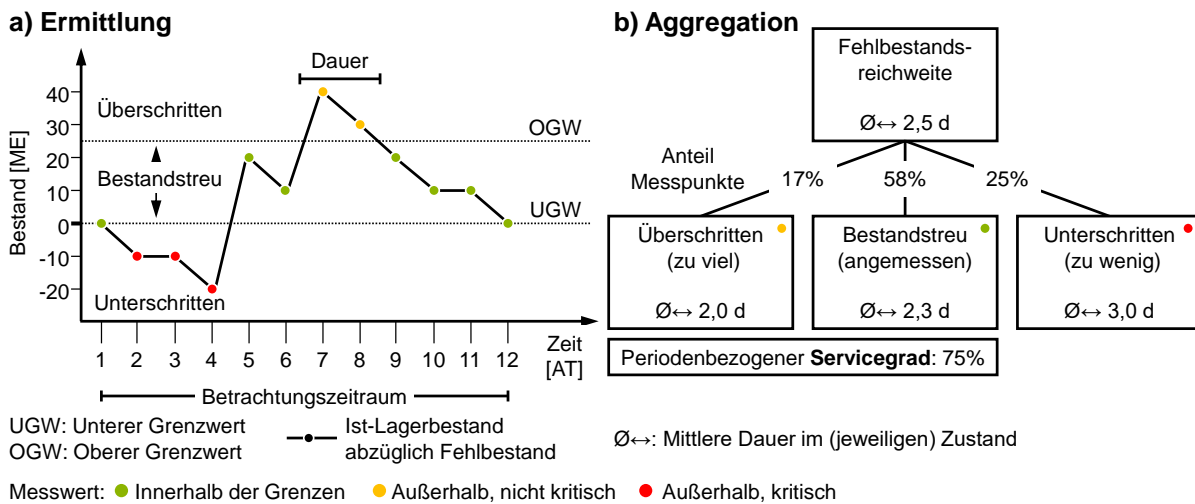
Zu den unternehmensspezifischen Faktoren zählen beispielsweise die Einflüsse der Kuppelproduktion oder unterschiedliche Schichtmodelle innerhalb einer Herstellkette.

#### **6.4.5 Servicegrad**

Der in dieser Arbeit verwendete *Servicegrad* beschreibt den Anteil der Perioden mit ausreichendem Lagerbestand bezogen auf einen Betrachtungszeitraum. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, kann es aus interner Dispositionssicht sinnvoll sein, neben dem Servicegrad auch die Fehlbestandsreichweite und damit indirekt die Terminabweichung aufgrund des geringen Servicegrades zu ermitteln.

Die Quantifizierung erfolgt wie in Bild 6.13 dargestellt. Zunächst werden obere und untere Grenzwerte für den Lagerbestand ermittelt. Die Grenzwerte sollten anhand der üblichen Bedarfsschwankungen festgelegt werden (vgl. Bild 6.14).

Anschließend wird der verfügbare Ist-Lagerbestand und damit in der Regel der Gesamtbestand abzüglich gesperrter und reservierter Bestände ermittelt. Insbesondere bei geringen oder nicht vorhandenen Beständen ist eine Ermittlung des Servicegrades anhand des Ist-Lagerbestands nicht aussagekräftig. Nur wenn Fehlbestände (ungedeckte Bedarfe) bestehen, wirkt sich ein nicht vorhandener Lagerbestand negativ auf den Servicegrad aus. Die Kurve in Bild 6.13a zeigt daher den Ist-Lagerbestand abzüglich des Fehlbestands. Werden Aufträge aufgrund fehlender Artikel neu terminiert, kann diese die Ermittlung des tatsächlichen Servicegrades erheblich erschweren.



**Bild 6.13** Quantifizierung der Fehlbestandsreichweite und des Servicegrads

Die Ermittlung der Bestandshöhen erfolgt üblicherweise zu festgelegten Zeitpunkten, beispielsweise täglich. Anhand der Grenzwerte werden drei Klassen gebildet und der Ist-Lagerbestand (abzüglich Fehlbestand) farblich gekennzeichnet: Bestände innerhalb der Grenzwerte sind nicht kritisch (grün). Bestandsunterschreitungen haben in der Regel Terminverzögerungen zur Folge und sind kritische (rot). Bestandsüberschreitungen sind in der Regel weniger kritisch und werden gelb markiert. Insbesondere bei hohen Bestandskosten (z.B. Edelmetalle) kann auch eine Überschreitung als kritisch markiert werden (Bild 6.13a).

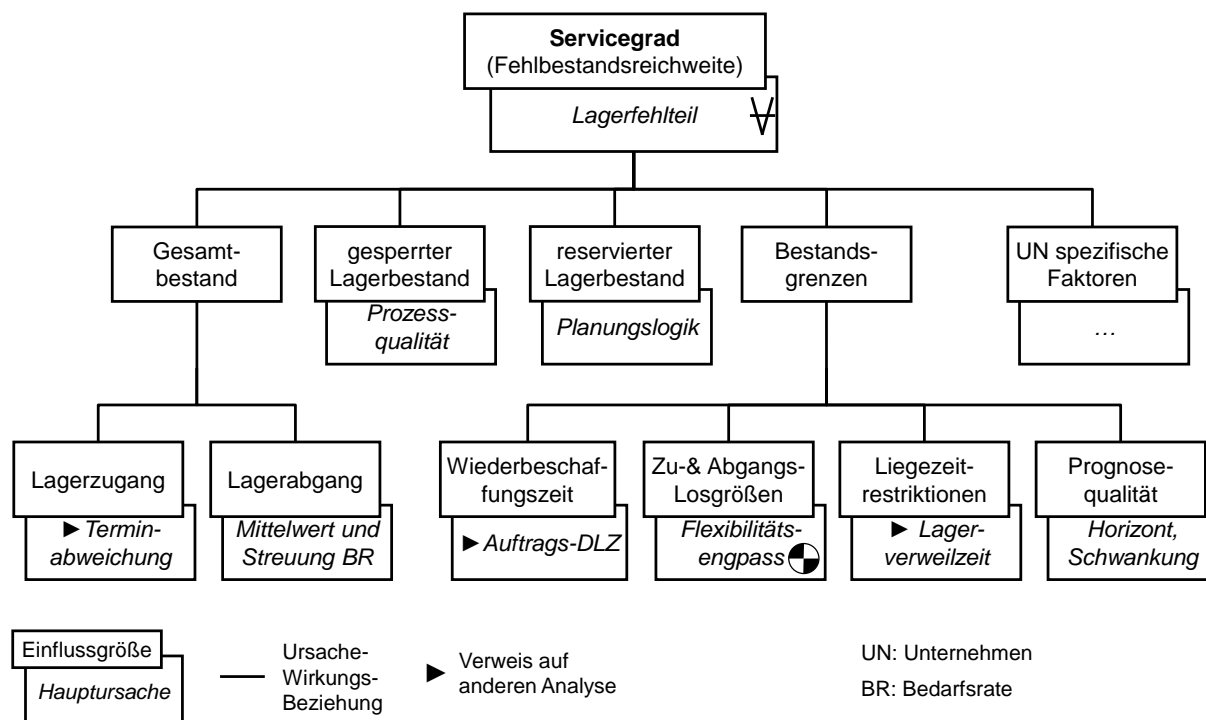
Aggregiert über mehrere Perioden innerhalb eines Betrachtungszeitraum lassen sich drei Kennzahlen ermitteln (Bild 6.13 b):

- Der *Anteil* der Messpunkte in der jeweiligen Klasse gibt die Häufigkeit der Über- bzw. Unterschreitungen an. Je höher der Anteil der Messpunkte mit Bestandstreu, desto exakter funktioniert die Lagerbestandsregelung.
- Der *periodenbezogene Servicegrad* ist die Summe der Anteile an bestandstremen Perioden und Perioden mit Bestandsüberschreitung.
- Die *mittlere Dauer* der Bestandsabweichung zeigt an, wie lange der jeweilige Zustand anhielt. Die Dauer der Bestandsunterschreitung zeigt die Fehlbestandsreichweite.



Kurze Bestandsabweichungen haben in der Regel geringere Auswirkungen auf das Gesamtsystem als lange Abweichungen.

Bild 6.14 zeigt die Einflüsse auf die Lagerbestandsabweichung und den Servicegrad. Zunächst sollten Artikel mit hohen Fehlbestandsreichweiten (Lagerfehlteile) untersucht werden.



**Bild 6.14** Relevante Einflussgrößen des Servicegrades und der Fehlbestandsreichweite

Einfluss auf den Gesamtbestand haben die Zu- und Abgänge des Lagers. Auswirkungen auf die Abweichungen der Lagerzugänge haben insbesondere Terminabweichungen der zufließenden Aufträge. Einfluss auf den Lagerabgang haben der Mittelwert und die Streuung der Bedarfsrate.

Der für die Produktion verfügbare Lagerbestand wird aus dem Gesamtbestand abzüglich des gesperrten und reservierten Lagerbestands ermittelt. Ursachen für Bestandssperrungen sind insbesondere Qualitätsprobleme. Bestandsreservierungen hängen von der verwendeten Planungslogik ab.

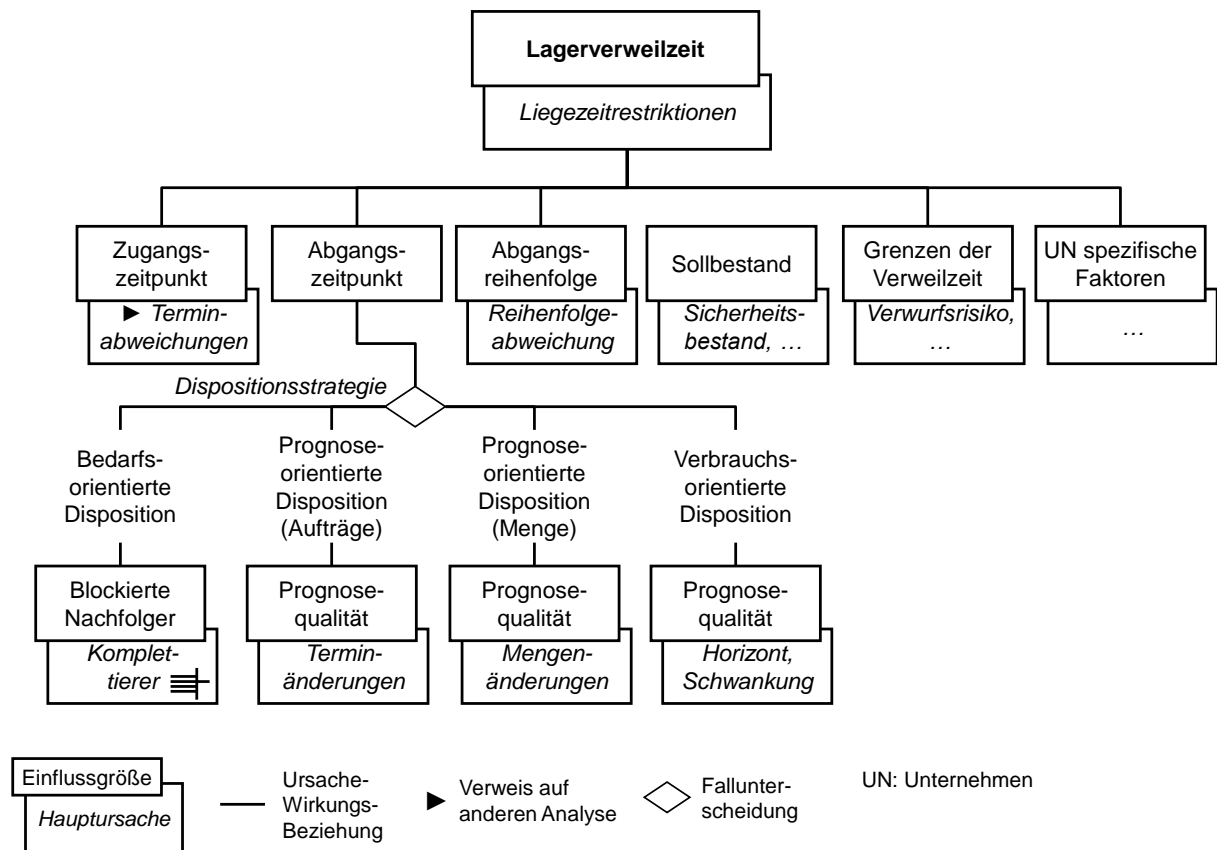
Zur Bestimmung der Bestandsabweichung sind, wie in Bild 6.13, dargestellt die Bestands-grenzen zu ermitteln. Sie hängen von vier Faktoren ab:

- Je höher die Wiederbeschaffungszeit, desto höher in der Regel die Grenzwerte. Die Wiederbeschaffungszeiten hängen von den Auftragsdurchlaufzeiten der internen und externen Lieferanten ab.
- Große Zu- und Abgangslose sowie Schwankungen und Streuungen der Losgrößen führen in der Regel zu weiter auseinanderliegenden Bestandsgrenzen. Die Losgrößen der Hersteleaufträge hängen in der Regel von der Flexibilität der Herstellkette ab. Die Flexibilitätseingpässe der verbundenen Herstellketten beeinflussen die Losgrößen maßgeblich.
- Liegezeitrestriktionen beschränken in der Regel die Bestandsgrenzen. Häufig führen prozessbedingte Liegezeiten (z.B. Abkühlzeiten) zu Bestandsuntergrenzen. Verfallsprozesse (z.B. bei Lebensmitteln) haben Auswirkungen auf die Bestandsobergrenzen. Der Abschnitt 6.4.6 untersucht die Lagerverweilzeit detailliert.
- Insbesondere bei prognoseorientierter Disposition hängen die Bestandsgrenzen von der Prognosequalität ab. Diese hängt wiederum vom Prognosehorizont sowie den Bedarfsschwankungen ab.

Unternehmensspezifische Faktoren sind unter anderem zusätzliche Sicherheitsbestände. Dazu zählen beispielsweise reservierte Bestände zur Ersatzteilversorgung.

#### **6.4.6 Lagerverweilzeit**

Die *Lagerverweilzeit* beschreibt die Zeit vom Zugang eines einzelnen Artikels bis zu dessen Abgang aus einem Lager und damit die Geschwindigkeit des Systems aus Artikelsicht. Bild 6.15 zeigt die Einflüsse auf die Lagerverweilzeit. Lager mit engen Liegezeitrestriktionen sollten priorisiert analysiert werden. Zu den Restriktionen zählen unter anderem ein hohes Verwurfsrisiko, beispielsweise durch Überalterung oder potenzielle Qualitätsprobleme.



**Bild 6.15** Relevante Einflussgrößen der Lagerverweilzeit

Abweichungen vom geplanten Zugangs- und Abgangszeitpunkt führen zu Abweichungen der mittleren Lagerverweilzeit. Ursachen für Abweichungen des Zugangszeitpunktes sind in der Regel Terminabweichungen der zuliefernden Aufträge. Abweichungen vom Abgangszeitpunkt sind abhängig von der Dispositionsstrategie:

- Bei bedarfsorientierter Disposition ist die Lagerverweilzeit üblicherweise null. Die Planung der nachfolgenden Aufträge erfolgt in der Regel ohne Lagerverweilzeiten. Ursache für Abweichungen im Abgangstermin sind in der Regel blockierte Nachfolger.
- Bei prognose- und verbrauchsorientierter Disposition sind Abweichungen in der Regel durch die Prognosequalität begründet. Häufig führen kurzfristige Änderungen der Abgangstermine, der Bedarfsmengen oder nicht zutreffende Prognosen zu Abweichungen des Abgangszeitpunkts.

Bestehen keine technischen und organisatorischen Einschränkungen, wird üblicherweise eine FIFO-Abgangsreihenfolge angestrebt. Abweichungen von einer FIFO-Abgangsreihenfolge führen zur Streuung der Lagerverweilzeiten der Artikel.

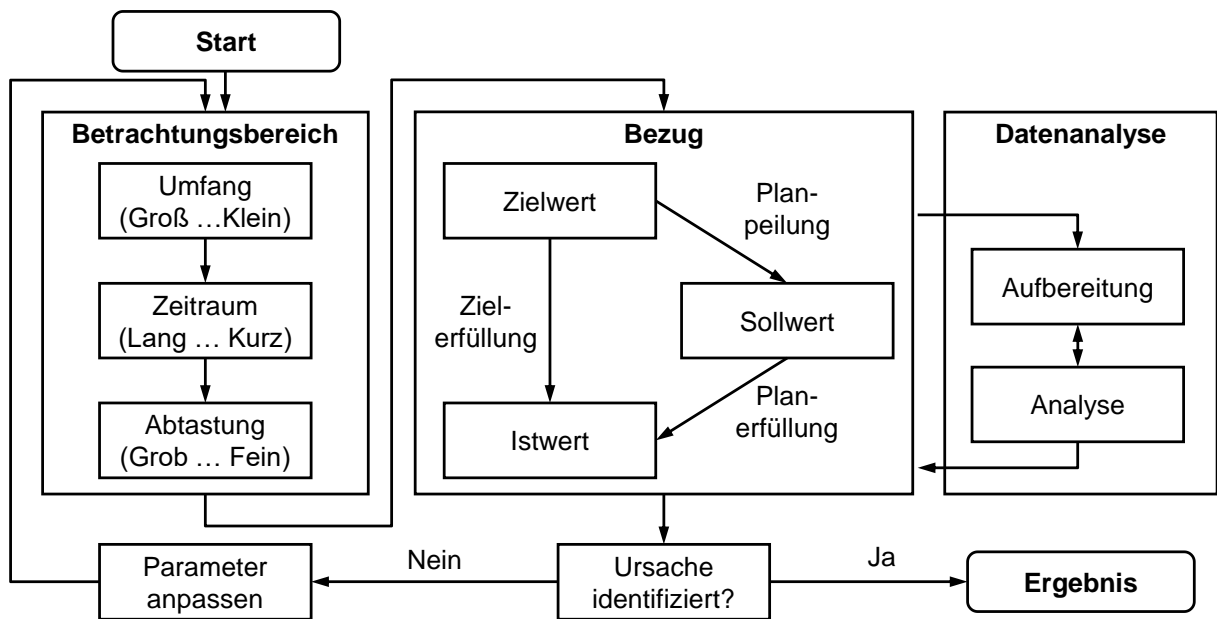
Der Sollbestand ist unter anderem abhängig von den festgelegten Sicherheits- und Mindestbeständen. Die Grenzen der Lagerverweilzeit werden häufig aufgrund technischer und wirtschaftlicher Restriktionen festgelegt. Insbesondere Artikel mit hohem Verwurfsrisiko wie beispielsweise Lebensmittel erfordern kurze Verweilzeiten. Zu den unternehmensspezifischen Faktoren zählen zusätzliche Verweilzeiten, beispielsweise aufgrund erhoffter Spekulationsgewinne.

## 6.5 Kennzahlenanalyse

Die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Einzelanalysen basieren auf Kennzahlen. Ziel der Kennzahlenanalyse ist es, über ein iteratives Vorgehen den Einfluss der jeweils untersuchten Kennzahl auf die logistische Zielerreichung zu quantifizieren. Die in Bild 6.16 dargestellte Mikro-Logik zeigt das Vorgehen zur Kennzahlenanalyse in drei Schritten:

- Der erste Schritt legt den *Betrachtungsbereich* für die untersuchte Kennzahl fest.
- Der zweite Schritt wählt eine geeignete *Zeitreihe* aus.
- Die *Datenanalyse* als dritter Schritt untersucht die Kennzahl statistisch und visualisiert sie.

Die Logik zur Auswahl des Betrachtungsbereichs und der Bezüge folgt dem Vorgehen der Wertstromanalyse, bei der zunächst ein grober Überblick über die Ist-Situation gewonnen wird, der anschließend zu detaillieren ist (Erlach 2020, S. 37). Die untersuchten Zeitreihen orientieren sich am regelkreisbasierten Systemmodell (vgl. Abs. 2.2.3). Die zeitreihenbasierte Analyse zielt darauf ab, die Ursachengruppen der Turbulenz im Auftragsmanagement darzustellen (Wiendahl 2011, S. 209).



**Bild 6.16** Mikro-Logik der Kennzahlenanalyse

### ***Betrachtungsbereich***

Ein zielgerichtet gewählter Betrachtungsbereich zeichnet sich entweder durch eine hohe mittlere Abweichung oder ihre hohe Streuung auf. Der erste Fall zeigt eine systematische Abweichung (Mittelwert) auf. Der zweite Fall deutet auf hohe Turbulenz hin (hohe Streuung bzw. Schwankung).

Die iterative Einschränkung des Betrachtungsbereichs erfolgt hinsichtlich Umfang, Zeitraum, und Abtastung. Ziel ist es, den Aufwand der Datenerhebung und Auswertung zu minimieren:

- **Umfang:** Die Kennzahlenermittlung erfolgt zunächst für das Gesamtsystem, um Bezugsgrößen zu ermitteln. Anschließend werden die Kennzahlen für einzelne Subsysteme (Segmente, Module) ermittelt. So lässt sich die Wirkung einzelner Subsysteme auf das Gesamtsystem abschätzen und priorisieren. Beispielsweise haben Abweichungen bei Produktionssegmenten mit hohem Mengenanteil in der Regel höhere Auswirkungen auf das Gesamtsystem als Segmente mit kleinem Mengenanteil.
- **Zeitraum:** Die Ermittlung der Kennzahlen erfolgt zunächst ausgehend vom aktuellen Zeitpunkt für einen großen Zeitraum (z.B. Jahr). Die so ermittelten Durchschnittswerte

werden auf grundsätzliche Plausibilität geprüft (z.B. produzierte Jahresstückzahl). Anschließend werden die Kennzahlen für kleinere Zeiträume erhoben, um Trends und Schwankungen erkennen zu können (z.B. Saisoneffekte).

- **Abtastung:** Je höher die Abtastfrequenz, desto kurzfristige Änderungen der Werte können erkannt werden. Die gewählte Frequenz richtet sich nach den Genauigkeitsanforderungen der Produktion sowie der Datenqualität (Wiendahl 2002, S. 187; Schönsleben 2020, S. 434–435). Erfolgt die Leistungsrückmeldung beispielsweise nur einmal pro Woche, ist eine tagesgenaue Abtastung überflüssig und führt ggf. zu Fehlinterpretationen.

### **Zeitreihe**

Für jede Kennzahl werden, ausgehend vom regelkreisbasierten Handlungsmodell, drei Zeitreihen erfasst und ausgewertet (vgl. Abs. 2.2.3 und 2.4.3). Die Reihenfolge der Zeitreihenanalyse folgt dem Grundsatz: Tatsachen (Istwerte) besitzen eine höhere Relevanz als vereinbarte Ziel- und geplante Sollwerte. Zunächst werden die drei Zeitreihen unabhängig voneinander untersucht (Bild 6.16):

- Die ex-post ermittelte Zeitreihe der *Istwerte* beschreibt den tatsächlich eingetretenen Zustand für die jeweilige Periode. Beispiel ist die tatsächliche Produktionsmenge in der untersuchten Periode. Aufgrund des hohen Realitätsbezugs steht die Analyse der Ist-Zeitreihe im Vordergrund des Vorgehens.
- Die Zeitreihe der *Zielwerte* beschreibt die Entwicklung der Zielwerte. Sie wird ex-ante erstellt, ist in der Regel über mehrere Soll-Perioden gültig und relativ stabil. Schwankungen der Zielwerte können hohe Turbulenz im System hervorrufen.
- Die Zeitreihe der *Sollwerte* beschreibt den zu erwartenden (antizipierten oder gestalteten) Systemzustand für eine oder mehrere Perioden. Sie wird auch ex-ante erstellt. Die Werte der Zeitreihe ändern sich in der Regel schneller als die der Zielzeitreihe. Schwankungen der Sollwerte erfordern eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit des Systems.

In der Regel konzentriert sich die Analyse auf die Ist-Zeitreihen, da die Werte der Ziel- und Soll-Zeitreihen meist konstanter sind. Eine Expertenbefragung prüft die grundsätzliche

Plausibilität der Daten. Anschließend folgt eine Analyse der Abweichungen zwischen zwei Zeitreihen:

- Die Zeitreihe der *Zielerfüllung*, gebildet aus der Differenz der Ist- und Ziel-Zeitreihe, beschreibt die Ist-Abweichung vom Ziel. Die Zielerfüllung wird häufig als Bewertungsgröße für die Leistung eines Systems verwendet.
- Die Zeitreihe der *Planerfüllung*, gebildet aus der Differenz zwischen Ist- und Soll-Zeitreihe beschreibt die Beeinflussbarkeit der Istwerte durch Sollwerte und damit die Abweichung des Regelkreises. Je geringer die Abweichung, desto präziser lässt sich das System lenken.
- Die Zeitreihe der *Planpeilung*, gebildet aus der Differenz zwischen Soll- und Ziel-Zeitreihe, beschreibt die Erreichbarkeit des Zielwerts bei Erreichen des Sollwerts. Je geringer die Abweichungen der Planpeilung, desto geringer sind in der Regel die Zielkonflikte zwischen den Zielvorgaben des Umsystems und den Soll-Handlungen des betrachteten Systems.

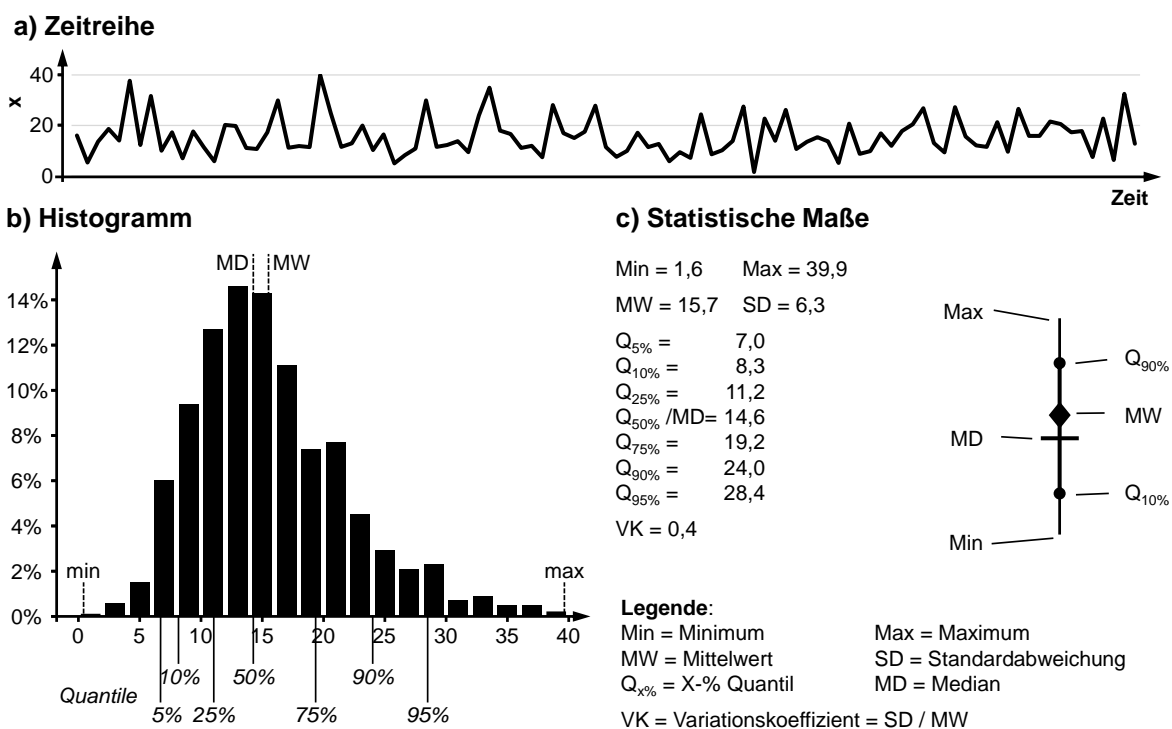
Die Abweichungsanalyse beginnt mit der Untersuchung der Zielerfüllung. Sofern sich damit keine Ursachen für die Dispositionskomplexität ermitteln lassen, werden auch Planerfüllung und Planpeilung untersucht.

### **Datenanalyse**

Ziel der Datenanalyse ist es, die Zeitreihen so aufzubereiten, dass sich anhand statistischer Maße die relevanten Eigenschaften erkennen und Schlussfolgerungen ziehen lassen. Bild 6.17 zeigt das Vorgehen in drei Schritten.

Vor der eigentlichen Analyse sind die Daten aufzubereiten. Dazu zählt insbesondere die Bereinigung und Bewertung von Datenfehlern sowie die Aufbereitung der Rohdaten in Zeitreihen (Bild 6.17a, vgl. Abs. 2.4.3, Günther et al. 2019). Die Darstellung der Daten als Histogramm ermöglicht die visuelle Identifikation von grundsätzlichen Mustern (Bild 6.17b) und erleichtert das Erkennen von Ausreißern und nicht bereinigten Datenfehlern.

Anschließend werden die statistischen Maße zur Beschreibung der Zeitreihe berechnet. Die Bestimmung von Mittelwert und Median dient der groben Einordnung. Minimum, Maximum sowie die Quantile zeigen die Verteilung der Datenpunkte innerhalb des Wertebereichs. Die Streuung lässt sich über Standardabweichung und Variationskoeffizient bestimmen. (Schönsleben 2020, S. 407–411, 433) Die Verdichtung und Darstellung in Form eines Boxplot ist insbesondere für den visuellen Vergleich mehrerer Kennzahlen hilfreich. (Bild 6.17c)



**Bild 6.17** Zeitreihenbasierte Visualisierung und Auswertung von Kennzahlen

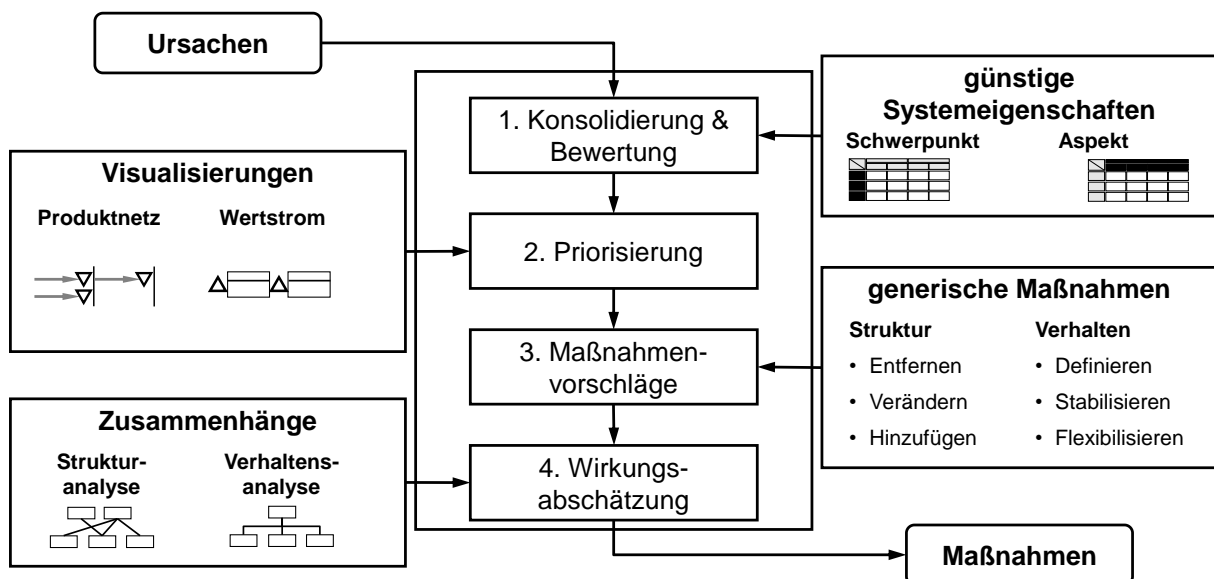
Der Detaillierungsgrad der Analysen hängt von der zu untersuchenden Kennzahl ab. So ist die Analyse strukturbezogener Kennzahlen (z.B. Variantenanzahl) in der Regel einfacher als die Analyse verhaltensbezogener Kennzahlen (z.B. Leistung).

Sobald sich Ursachen ableiten lassen, werden diese als Ergebnis notiert und die Analyse für die jeweilige Kennzahl abgeschlossen. Können in einer ersten Iteration keine Ursachen identifiziert werden, wird der Betrachtungsbereich angepasst und die Analyse erneut durchlaufen (Bild 6.16).



## 6.6 Ursachenkonsolidierung

Typischerweise werden bei Durchführung und Interpretation der Einzelanalysen und Visualisierungen zahlreiche Ursachen für eine geringe logistische Zielerreichung sowie potenzielle Verbesserungen unterschiedlichster Art auf unterschiedlichen Detaillierungsniveaus identifiziert. Ziel des letzten Analyseschritts ist es, die Ursachen der Dispositionscomplexität zu konsolidieren, um möglichst konkrete, priorisierte Maßnahmenvorschläge abzuleiten.



**Bild 6.18** Vorgehen zur Ursachenkonsolidierung

Bild 6.18 zeigt das Vorgehen. Es orientiert sich lose am Vorgehen des Systems Engineering für Verbesserungsprojekte (Haberfellner et al. 2015, S. 291–293). Ausgangspunkt bilden die gesammelten Ursachen der Dispositionscomplexität. Die Ableitung der Maßnahmen erfolgt in vier Schritten:

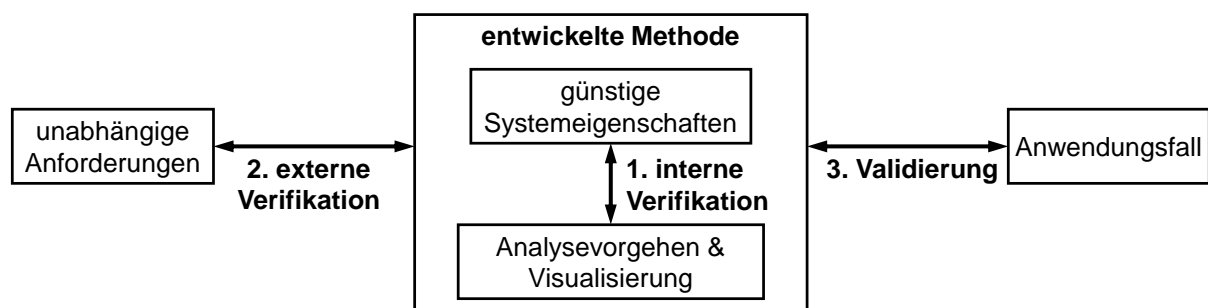
1. **Konsolidierung und Bewertung:** Die Konsolidierung und Bewertung der Analyseergebnisse erfolgt anhand der zwölf günstigen Systemeigenschaften (Abs. 5.2). Für jede der Eigenschaften wird der Erfüllungsgrad bewertet. Ergebnis ist ein Überblick über die zentralen Handlungsfelder.

2. **Priorisierung:** Ausgehend vom Produktnetz und dem Wertstrom werden Elemente in den Handlungsfeldern priorisiert, die eine hohe Wirkung auf die logistische Zielerreichung des Gesamtsystems haben. Häufig sind dies die Engpässe des Systems.
3. **Maßnahmenvorschläge:** Zur Abschwächung der Ursachen werden Maßnahmenvorschläge erarbeitet. Aus Struktursicht lassen sich Objekte und Hierarchien entfernen, verändern oder hinzufügen. Fehlen Ziel- und Sollwerte muss das Verhalten des Systems zunächst definiert werden. Anschließend lässt sich das Verhalten stabilisieren oder flexibilisieren. Ziel ist es, Maßnahmenvorschläge zu entwickeln, die das Erreichen der günstigen Systemeigenschaften fördern.
4. **Wirkungsabschätzung:** Ausgehend von der Struktur- und Verhaltensanalyse werden die Einzelmaßnahmen auf ihre Gesamtwirkung sowie gegen die bestehende Systemarchitektur geprüft. Dies soll Maßnahmen vermeiden, die zwar zu punktuellen Verbesserungen führen, jedoch die logistische Zielerreichung des Gesamtsystems nicht verbessern. Eine solche Wirkungsabschätzung kann nur unternehmensindividuell erfolgen.

Ergebnis sind möglichst konkrete Maßnahmen. Mit Hilfe des entwickelten Analyseverfahrens lässt sich die Wirkung der Maßnahmen, zumindest ex-post bewerten.

## 7 Theoretische und empirische Prüfung

Ziel des Kapitels ist es, die entwickelte Methode zur Analyse der Dispositionskomplexität im Anwendungszusammenhang zu prüfen. Der Begründungszusammenhang in den angewandten Wissenschaften kann nicht mit gleicher Stringenz geprüft werden wie in den Grundlagenwissenschaften, da die Realisierung in der Regel noch aussteht oder eine reproduzierbare Ausgangslage nicht herstellbar ist. (Grossmann 1992, S. 11–12, vgl. Ulrich et al. 2001, S. 173)



**Bild 7.1** Vorgehen zur Prüfung der entwickelten Methode

Um dem Problem der geringen Falsifizierbarkeit in diesem Anwendungsbereich entgegenzuwirken, erfolgt die Prüfung der Methode in drei Schritten (Bild 7.1):

1. **Interne Verifikation:** Zunächst erfolgt eine Prüfung der inneren Konsistenz der Methode. Dazu werden die synthetisierten günstigen Systemeigenschaften dem entwickelten Analyseverfahren und der Visualisierung gegenübergestellt.
2. **Externe Verifikation:** Anschließend wird die entwickelte Methode anhand eines unabhängig entwickelten Anforderungskatalogs für Methoden zur Komplexitätsbewältigung geprüft.
3. **Validierung:** Abschließend erfolgt die Überprüfung der Methode im Sinne eines Falsifizierungsversuchs anhand eines Praxisbeispiels.

## 7.1 Prüfung der inneren Konsistenz (interne Verifikation)

Der Abschnitt prüft die innere Konsistenz zwischen günstigen Systemeigenschaften und dem Vorgehen der Methode. Der nach den Systemaspekten gegliederte Abschnitt zeigt, in welchem Teil des Vorgehens die jeweilige günstige Eigenschaft geprüft wird (vgl. Bild 2.6).

Schwerpunkt bei der Prüfung des *strukturellen Aspektes* bildet die Vielfalt:

- **Geringe Objektvielfalt:** Die Objektvielfalt lässt sich einerseits über die Anzahl der dargestellten Verbindungen prüfen. Andererseits werden Kennzahlen (z.B. die Anzahl unterschiedlicher Herstellketten) erhoben, mit denen die Vielfalt bewertbar ist.
- **Geringe Variantenanzahl:** Die Variantenanzahl wird im Datenkasten des Lagers im Produktnetz dargestellt. Die Ausfallrisiko-Analyse unterstützt bei der Identifikation kritischer Artikel und Arbeitssysteme.
- **Flexible Auftragsreihenfolge:** Der FIFO-Materialfluss ist über Zusatzsymbole im Puffersymbol innerhalb des Wertstroms dargestellt.

Die Prüfung des *hierarchischen Aspektes* konzentriert sich auf die Vernetzung der Subsysteme:

- **Lose Kopplung:** Die Einzelanalysen des Ausfallrisikos und der Vernetzung zeigen die Kopplung der Subsysteme.
- **Gezielte Variantenentstehung:** Das Produktnetz bildet die Variantenentstehung im Zeitverlauf ab. Zudem lässt sich erkennen, welche Module für eine hohe Vielfalt verantwortlich sind.
- **Klare Zuordnung:** Über die Rahmenart der Arbeitssysteme kann im Wertstrom erkannt werden, ob ein Arbeitssystem klar zugeordnet ist oder mehrere Module bzw. Segmente bedient. Die Vernetzungsanalyse zeigt die Zusammenhänge zudem detailliert.

Prüfeschwerpunkt des *funktionalen Aspekts* ist die Zuverlässigkeit:

- **Zuverlässige Funktion:** Im Produktnetz zeigt die Sicherheitszeit die zeitliche Koppelung der einzelnen Module. Im Wertstrom zeigen die Pufferbestandsreichweiten die zeitliche Kopplung der Arbeitssysteme.
- **Hohe Qualität:** Die Qualitätskennzahlen in den Datenkästen zeigen Bereiche auf, in denen die beschaffte, weiterverarbeitete oder gelieferte Artikelqualität verbesserbar ist.
- **Flexible Leistungserbringung:** Die Restkapazität und damit die Möglichkeit zur kurzfristigen Kapazitätssteuerung der Arbeitssysteme ist über den Datenbalken der Leistung im jeweiligen Datenkasten dargestellt. Detailliert lässt sich die Restkapazität der Arbeitssysteme über die Analyse der Ist-, Soll- und Ziel-Zeitreihe sowie deren Abweichungen prüfen.

Der *entwicklungsbezogene Aspekt* konzentriert sich auf die Entwicklung des Systems:

- **Kontinuierliche Entwicklung:** Über die Analyse vergangener Zeitreihen lassen sich die kontinuierlichen Verbesserungen der logistischen Zielerreichung prüfen.
- **Produktionsgerechte Komponentenentwicklung:** Über den Vergleich logistischer Kennzahlen von neu entwickelten und lange bestehenden Komponenten lassen sich die logistischen Auswirkungen der Komponentenentwicklung überprüfen. Beispielsweise lassen sich reduzierte Rüst- und Einzelzeiten von weiterentwickelten Komponenten bewerten.
- **Kontinuierliche Verbesserung:** Die Datenkästen der Arbeitssysteme im Wertstrom zeigen die aktuelle logistische Leistung. Über Zeitreihenanalysen lässt sich die Entwicklung der logistischen Leistung der Arbeitssysteme prüfen.

Die Prüfung der inneren Konsistenz zeigt, dass das Analyseverfahren den strukturellen, hierarchischen und funktionalen Aspekt ausführlich prüft. Die Prüfung des entwicklungsbezogenen Aspekts erfolgt mit Hilfe der vorstellten Methode knapp. Dennoch ermöglicht die Methode die systematische Prüfung der zwölf günstigen Systemeigenschaften. Visualisierungen stellen Abweichungen von den günstigen Eigenschaften dar.

## 7.2 Prüfung anhand unabhängiger Anforderungen (externe Verifikation)

Wie in Kapitel 1 beschrieben, sollen Hypothesen möglichst falsifizierbar sein. Je komplexer das zu untersuchende Forschungsgebiet, desto geringer jedoch der Grad der Falsifizierbarkeit. (Hayek 1972, S. 17–18; Grossmann 1992, S. 12)

Anhand bestehender theoretischer Grundlagen, bekannter Denkfehler und Thesen entwickelt Grossmann einen 44 Fragen umfassenden Katalog. Dieser untergliedert die Anforderungen an ein Vorgehen zum Komplexitätsmanagement in sechs Gruppen. (Grossmann 1992, S. 190–199).

Zur Verifikation wird der Erfüllungsgrad der entwickelten Methode für jede der 44 Fragen überprüft. Anhang A.2 stellt dies ausführlich dar. Der Abschnitt zeigt zusammengefasst die Überprüfung anhand der sechs Gruppen.

1. **Dimensionale Anforderungen:** Die entwickelte Methode berücksichtigt die beiden Dimensionen Struktur und Verhalten in den Aspekten Produkt und Produktion. Durch die Verbindung von Struktur und Verhalten findet ein steter Abgleich zwischen den Dimensionen statt. Die Methode erfüllt die Anforderungen vollständig.
2. **Theoretische Anforderungen:** Das Produkt-Produktionssystem wird hierarchisch, objektorientiert, als offenes, grundsätzlich erweiterbares, System abgebildet. Zeitliche Veränderungen sind als Zeitreihen modelliert. Die zweistufige Visualisierung fördert eine geeignete Informationsverarbeitung. Die Methode erfüllt die Anforderungen für den Anwendungsbereich vollständig.
3. **Deskriptive Anforderungen:** Schwerpunkt der Methode ist die Analyse quantitativer Aspekte. Die Abbildung qualitativer Aspekte erfolgt daher nur verkürzt.
4. **Praktische Anforderungen:** Die Ursache-Wirkungs-Bäume gliedern Problemursachen systematisch. Die Erweiterbarkeit der Ursache-Wirkungs-Bäume erleichtert die Integration weiterer Aspekte, zudem regt sie die menschliche Fähigkeit zur Problemlösung an. Die Methode erfüllt die Anforderungen im Bereich der Systemanalyse vollständig.

5. **Ansatzorientierte Anforderungen:** Das systematische, modellorientierte, auf bestehenden Strukturen (Mustern) aufbauende Vorgehen nutzt die günstigen Systemeigenschaften. Auf den entwickelten Kennzahlen lässt sich in einem weiteren Schritt ein Controlling-System der Dispositionscomplexität aufbauen. Die Methode erfüllt die Anforderungen im Bereich der Systemanalyse vollständig.
6. **Anleitungsorientierte Anforderungen:** Die Visualisierungen stellen die Struktur- und Verhaltensanalysen in anschaulicher, integraler Weise dar. Die hierarchischen Ursache-Wirkungs-Darstellungen fördern ein iteratives Vorgehen zur Veränderung von Struktur- und Verhalten. Konkrete Handlungsanweisungen und Problemlösungen betrachtet die entwickelte Methode mit Analyseschwerpunkt nur knapp.

**Fazit:** Die entwickelte quantitative Analysemethode erfüllt die Anforderungen an eine Methode zur Komplexitätsbewältigung im Bereich quantitativer Analysen der Disposition für wertstromorientierte Variantenfertiger vollständig. Die Methode erfüllt die Anforderungen in den Bereichen qualitative Einflüsse sowie Umsetzungsunterstützung größtenteils. Aufgrund der getroffenen Einschränkungen des Betrachtungsbereichs auf die Systemanalyse ist dies vertretbar und nachvollziehbar.

### 7.3 Fallbeispiel aus der Fahrzeugindustrie „Zulieferer AG“ (Validierung)

Ziel der Validierung ist es, die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methode anhand eines Fallbeispiels zu prüfen. Die Gliederung des Abschnitts folgt dem in Bild 5.1 vorgestellten Vorgehen. Nach Beschreibung der aktuellen Situation wird das System in Segmente und Module gegliedert und hinsichtlich Ausfallrisiko und Vernetzung untersucht. Die weitere Untersuchung orientiert sich an den Visualisierungen von Produktnetz und Wertstrom. Ergebnis der Analyse sind konsolidierte Ursachen und daraus abgeleitete Maßnahmen. Die Betrachtung von Aufwand und Nutzen schließt den Abschnitt ab.

Aus Geheimhaltungsgründen darf der Firmenname im Fallbeispiel nicht genannt werden. Kritische Daten wurden im Fallbeispiel geändert oder ausgeblendet.

### 7.3.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die im Fallbeispiel untersuchte Produktion erfolgt an einem Standort eines weltweit tätigen Zulieferers der Fahrzeugindustrie, der sogenannten „Zulieferer AG“. Bild 7.2 stellt die Einordnung der untersuchten Produktion anhand der Morphologie der wertstromorientierten Variantenfertigung dar.

Merkmale		Ausprägungen			
Produktprogramm	Kundenbezug	kundenspezifisch	Produktfamilien (variantenreich)	Standardprodukt (mit Varianten)	Standardprodukt
	Zulieferebene	Einzelteil	Komponente	Endprodukt	
	Stücklistentiefe / Dispositionsstufen	viele	wenige	einstufig	Handel (inkl. externe Produktion)
Arbeits-system	Ablaufprinzip	Baustelle	Werkstatt	Insel	Linie
	Materialflusskomplexität	komplex mit Rückflüssen	komplex ohne Rückflüsse	linear	
	Externe Bearbeitung	Keine	Geringer Anteil	Hoher Anteil	Sehr hoher Anteil
Kunden-auftrag	Bevorratungsstrategie	engineer-to-order	make-to-order	assemble-to-order	make-to-stock
	Auftragstyp	Einzelstück	Kleinserie	Serie	Großserie Massenfertigung
	Anteil Eilaufträge	Keine Eilaufträge	Geringer Anteil	Hoher Anteil	
Produktions-auftrag	Turbulenz durch geänderte Aufträge	Unbedeutend	Gering	Hoch	Sehr hoch
	Auslösegrund	Nachfrage Kundenauftrag	Prognose Vorhersageauftrag	Verbrauch Lagernachfüllauftrag	Prognose Rahmenvertrag
	Auftragstyp	Einzelstück	Kleinserie	Serie	Großserie Massenfertigung

**Bild 7.2** Einordnung der „Zulieferer AG“ als wertstromorientierte Variantenfertigung

Produziert werden mehrstufige mechanische Präzisionskomponenten. Die Produktion ist anhand der Baugruppen in Inseln gegliedert, wobei nicht immer alle notwendigen Arbeitsvorgänge innerhalb der jeweiligen Inseln durchgeführt werden.

Die Disposition der Kundenaufträge mit kleinen Losgrößen erfolgt für die gesamte Produktion ausschließlich bedarfsorientiert. Eilaufträge aus Kundensicht sowie Turbulenzen durch geänderte Aufträge spielen eine untergeordnete Rolle. Produktionsaufträge werden in kleinen Losgrößen ausschließlich bedarfsorientiert erzeugt. Bedarfszusammenfassungen finden kaum statt.

Auslöser des Verbesserungsprojekts ist die geringe interne Termintreue gegenüber dem Versandlager. Sie erzeugt hohe Turbulenzen für die Lieferlogistik. Teilweise beeinflusst die



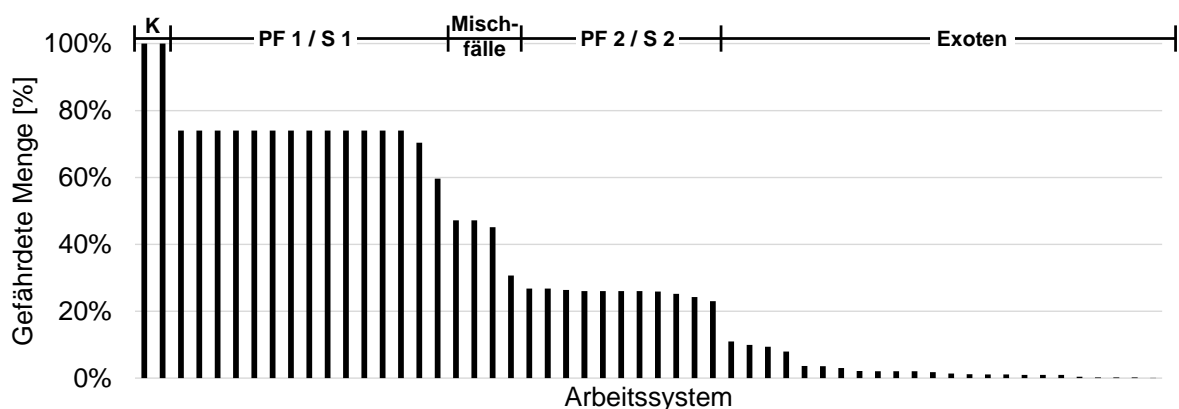
geringe interne Termintreue auch die Liefertreue gegenüber den Kunden. Die Unternehmensleitung vermutet einen Zusammenhang zwischen der Dispositionskomplexität innerhalb des Produkt-Produktionssystems und der geringen Termintreue. Dieser Zusammenhang soll mit Hilfe der entwickelten Methode zur Analyse der Dispositionskomplexität systematisch geprüft werden.

Dem Projekt ging eine vereinfachte Wertstromanalyse voraus, die zwei zentrale Produktfamilien identifizierte. Während der Analyse wurden für die beiden Familien die grundlegenden Prozessparameter und Materialflussbeziehungen vor Ort aufgenommen. Ausgehend von den Analyseergebnissen wurden für kritische Arbeitssysteme bereits erste Maßnahmen zur Leistungsstabilisierung eingeführt.

Neben der Wertstromanalyse stehen Plan- und Produktionsauftragsdaten zur Verfügung. Beschaffungsaufträge, Stücklisten sowie Bestandsdaten sind aufgrund technischer und organisatorischer Beschränkungen nur auszugsweise analysierbar.

### 7.3.2 Gliederung und Strukturanalyse der Produktion

Zunächst gilt es, das System in geeignete Segmente und Module zu untergliedern (vgl. Abs. 5.4). Eine günstige Gliederung in zwei relativ unabhängige Segmente zeichnet sich bereits durch die Analyse des Ausfallrisikos ab.



K: Kritisch PF: Produktfamilie S: Segment

**Bild 7.3** Quantifizierung des Ausfallrisikos (Auszug)

Bild 7.3 zeigt die untersuchten Arbeitssysteme sowie die durch den Ausfall eines Arbeitssystems gefährdete Produktionsmenge. Ausgehend von den beiden in der Wertstromanalyse identifizierten Produktfamilien lassen sich die Arbeitssysteme grob in fünf Gruppen unterteilen:

- **Kritische Arbeitssysteme:** Die Arbeitssysteme Lackierung sowie thermische Bearbeitung sind kritische Arbeitssysteme. Der Ausfall eines solchen Arbeitssystems stellt ein hohes Risiko für die gesamte Produktionsmenge dar, da alle Bauteile lackiert und thermisch behandelt werden müssen.
- **Produktfamilie 1:** Die zweite Gruppe ist für ca. 70% der Produktionsmenge notwendig und lässt sich eindeutig einer Produktfamilie zuordnen. Ein Ausfall betrifft alle Produkte des Segments.
- **Mischfälle:** Die dritte Gruppe von Arbeitssystemen beliefert beide Segmente, wird jedoch nicht für alle Produkte innerhalb eines Segments benötigt. Ihr Ausfall betrifft einen Großteil der Produkte beider Segmente.
- **Produktfamilie 2:** Die Gruppe ist für ca. 30% der Produktionsmenge notwendig und lässt sich eindeutig der zweiten Produktfamilie zuordnen. Ein Ausfall betrifft die Produkte der Produktfamilie 2.
- **Exoten:** Ein Ausfall der Arbeitsplätze betrifft einzelne Produkte und damit nur einen Bruchteil der Gesamtmenge. Es handelt sich in der Regel um Arbeitssysteme für exotische Produkte oder Nacharbeiten.

Die Segmente der Produktion werden folglich anhand der beiden, relativ unterschiedlichen Produktfamilien des Standorts gebildet. Die Produktion in Segment 1 konzentriert sich auf aufwändige mehrstufige Produkte mit Variantencharakter. Der Schwerpunkt in Segment 2 liegt auf einfachen Produkten mit Seriencharakter.

Die Modulbildung erfolgt anhand der in den jeweiligen Segmenten bzw. Produkten verwendeten Komponentenfamilien. Schwerpunkt bei der Gliederung der untersuchten Produktion bildet der strukturelle Systemaspekt. Eine weitere Differenzierung der Gliederung

anhand des Vielfaltstyps ist nicht notwendig, da die logistischen Anforderungen innerhalb der einzelnen Module relativ homogen sind.

Bild 7.4 zeigt auszugsweise die von den einzelnen Arbeitssystemen für die jeweiligen Segmente und Module erbrachte Leistung und damit die Vernetzung. In den Zeilen sind die Arbeitssysteme aufgeführt. Die Spalten zeigen die Leistung der Arbeitssysteme sowie, über Datenbalken visualisiert, die prozentuale Verteilung der Leistung auf die einzelnen Segmente und Module. Der hier gezeigte Ausschnitt zeigt lediglich Module aus Segment 1. Das Produktnetz greift die hier verwendeten Modulbezeichnungen wieder auf (vgl. Bild 7.5).

Arbeitssystem Name	Leistung Soll [ZE/AT]	Anteil für Segmente...			Anteil für Modul...										
		S 1	S 2	# S	M0	M1	M1.1	M1.2	M2	M2.1	M2.2	M3	...	# M	
...	...														
Thermische Bearb.	***	■	■	2						■	■	■			4
Lack Vor-/Nachb.	***	■		2	■										2
Wäsche	***	■		1		■	■	■		■	■	■			6
***	***	■		1			■	■							2
***	***	■		1	■										1
***	***	■		1					■						1
***	***	■		1	■										1
***	***	■		1		■									1
***	***	■		1								■	■		1
***	***	■		1	■							■			1
...	...														
***	***		■	1											2
***	***		■	1											1
***	***		■	1											1
***	***		■	1											1

#S: Anzahl Segmente #M: Anzahl Module

**Bild 7.4** Quantifizierung der Vernetzung (Auszug)

Die Mehrzahl der Arbeitssysteme erbringt lediglich Leistung in einem Segment oder Modul. Nur die Lackierung und die thermische Bearbeitung erbringen Leistung für beide Segmente. Im näher betrachteten Segment 1 wird die zentrale Wäsche in sechs Modulen eingesetzt.

Die Analyse der Vernetzung zeigt, dass die gewählte Systemgliederung geeignet ist, die Subsysteme relativ unabhängig voneinander zu untersuchen, da die Mehrzahl der Arbeits-

systeme eindeutig einem Segment und Modul zuordenbar ist. Die Analyse des Ausfallrisikos zeigt, dass die Arbeitssysteme Lackierung und thermische Bearbeitung unabhängig von der gewählten Gliederung nur dem Gesamtsystem zuordenbar sind.

### **7.3.3 Visualisierung und Analyse im Produktnetz**

Nach Gliederung des Systems werden die Module und ihre Zusammenhänge im Produktnetz im Überblick visualisiert und analysiert (vgl. Abs. 5.5.1). Bild 7.5 zeigt exemplarisch das finale Produktnetz für das umsatzstärkere Segment 1. Die Beschreibung des Produktnetzes erfolgt anhand der vier Stufen (vgl. Abs. 5.5.1). Die Legende in Anhang A.3 beschreibt die verwendeten Symbole.

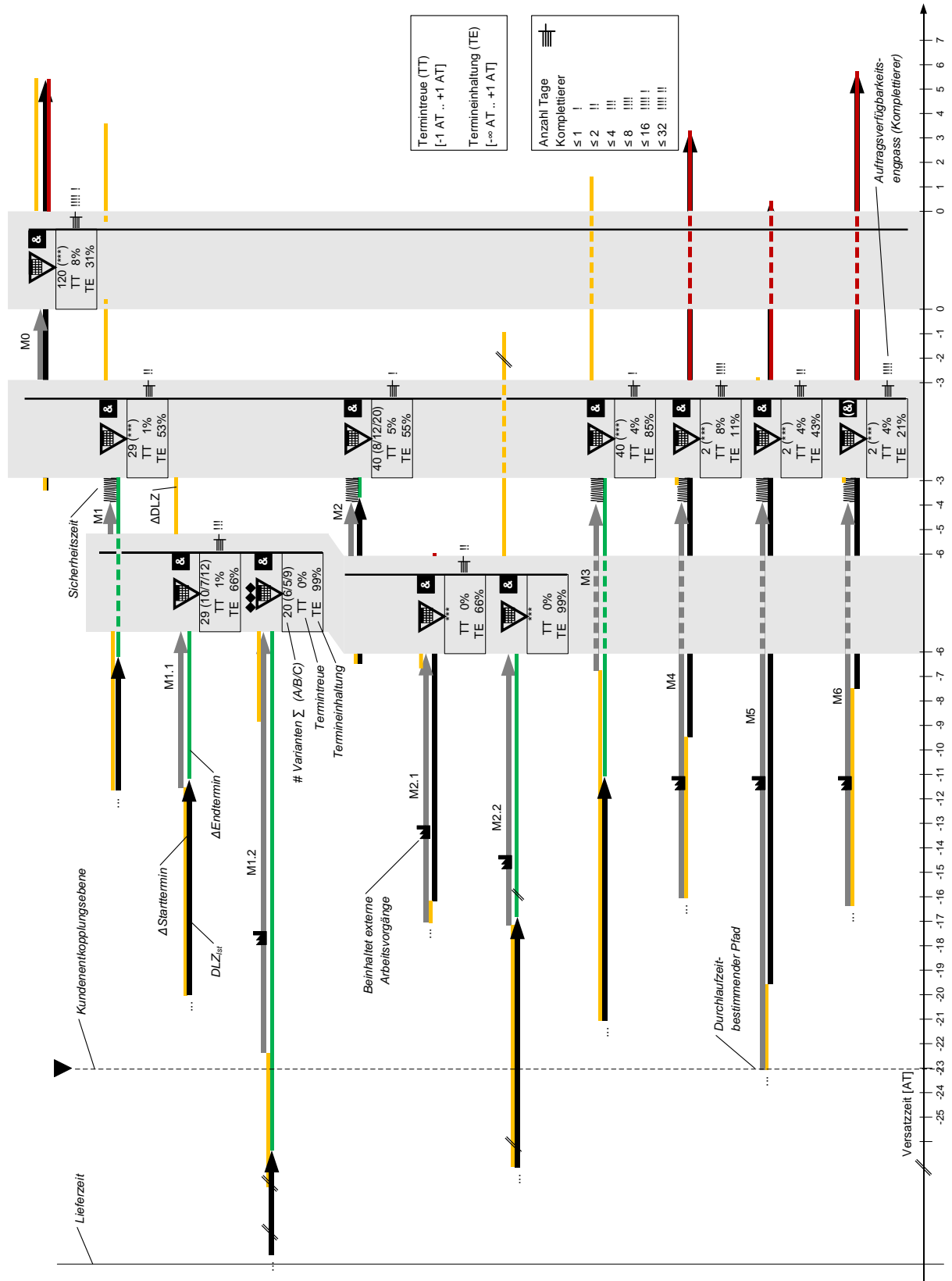


Bild 7.5 Produktnetz des Segments 1

**Stufe 1: Komplettierungsstruktur**

Die Komplettierungsstruktur des Segments ist relativ einfach und zeigt keine nennenswerten Verzweigungen. Bei den Modulen handelt es sich mehrheitlich um notwendige, UND-verknüpfte Komplettierungen. Die Datenerhebung und Strukturierung des Produktnetzes erfolgte im Rahmen mehrerer Workshops mit Prozessexperten unter Zuhilfenahme repräsentativer Stücklisten.

Der Großteil der Produktvarianten entsteht erst im Montagemodul durch die Kombination einzelner Komponenten. Eine klare Trennung in variantenbestimmende Module (M1-M3) und Module zur Herstellung von Standardkomponenten (M4-M6) ist an der in den Lägern dargestellten Variantenanzahl erkennbar.

**Stufe 2: Dispositionsstruktur**

Die Durchlaufzeit eines Kundenauftrags beträgt ca. 23 AT. Die Dauer wird maßgeblich durch die Durchlaufzeiten der Module M5 und M0 bestimmt. Die gegenüber den Kunden kommunizierte Lieferzeit bei Auftragsannahme entspricht der Summe der Durchlaufzeiten und der aktuellen Belastungsverschiebung. Der Anteil an Eil- und Überholanfragen ist vernachlässigbar. Aufgrund der aktuell langen Belastungsverschiebung können Bedarfe geglättet und langfristig geplant werden. Da die mit den Kunden vereinbarten Lieferzeiten deutlich länger als die internen Durchlaufzeiten sind, erfolgt die Disposition aller Eigenfertigungskomponenten bedarfsorientiert.

Die Soll-Durchlaufzeiten der Montage (M0) und die der zentralen Komponenten (M1-M3) sind im Vergleich zur Gesamtdurchlaufzeit relativ kurz. Lange Durchlaufzeiten entstehen insbesondere bei Modulen mit externer Bearbeitung. Über das Fabriksymbol lassen sich solche Module leicht identifizieren. Technische und organisatorische Einschränkungen verhindern eine Verkürzung der Durchlaufzeit der externen Bearbeitungen. Aufgrund der kundenseitig akzeptierten langen Lieferzeiten stellt die Durchlaufzeit kein nennenswertes Problem für die Produktion dar.

**Stufe 3: Kennzahlen**

Aufgrund der vollständig bedarfsorientierten Disposition konzentriert sich die Visualisierung auf die Darstellung der Termintreue und der Hauptursachen für eine geringe Termintreue: Endterminabweichungen, verursacht durch Starttermin- und Durchlaufzeitabweichung (vgl. Abs. 6.4.1). Aufgrund der zahlreichen Änderungen am Produkt-Produktionssystem wurde der Analysezeitraum auf einen Kalendermonat beschränkt.

Die Termintreue ist mit 0 – 8% sehr gering. Die Termineinhaltung der einzelnen Module streut mit 11% – 99% stark. Aufträge im Modul Montage (M0) werden im Schnitt 0,5 Tage zu früh gestartet (-3,5 AT Versatzzeit), benötigen im Mittel 5,5 Tage länger im Durchlauf als geplant und enden mit einer mittleren Terminabweichung von +5,5 Tagen zu spät. In den Modulen M1 & M2 sowie den zuliefernden Modulen (M1.1, M1.2, M2.1, M2.2) werden Aufträge teilweise deutlich vor dem geplanten Endtermin fertiggestellt. In den Modulen M1.1, M1.2 und M2.2 ist dies insbesondere durch den deutlich zu frühen Auftragsstart begründet. Dies erklärt die hohe Termineinhaltung bei geringer Termintreue.

Die Aufträge der Module M4, M5 und M6 werden im Mittel zu spät fertig, was zu geringerer Termintreue und Termineinhaltung führt. Deutlich zu erkennen ist der zu späte Start als Ursache der Endterminabweichung. Die mittlere Durchlaufzeitabweichung der Aufträge in den drei Modulen ist vernachlässigbar.

**Stufe 4: Engpasskennzeichnung**

Aufgrund der vollständig bedarfsorientierten Disposition wird lediglich der Kompletierer bestimmt. Die Ermittlung des Lagerfehltails ist nur bei verbrauchs- und prognoseorientierter Disposition sinnvoll. Aufgrund fehlender Daten musste die Ermittlung des Kompletierers situationsbezogen angepasst werden: Dasjenige Modul aus der Menge miteinander verbundener Module mit der höchsten positiven Endterminabweichung (= höchsten Verspätung) gilt für den jeweiligen Arbeitstag als Kompletierer. Aus Montagesicht (M0) stellt damit Modul 6 in der Mehrheit der Arbeitstage den Kompletierer dar. Aufgrund der hohen mittleren Endterminabweichung in M6 ist dies naheliegend. Dennoch bilden alle weiteren Module (M1-M5) ebenfalls an mindestens einem Arbeitstag den Kompletierer. Die

Endterminabweichungen der Module schwanken stark und es existieren wechselnde (dynamische) Komplettierer.

Die Startterminabweichung in den Modulen M4, M5 und M6 ist auf die hohen Lagerfehlbestände der zugehörigen (nicht dargestellten) Lager zurückzuführen. Ursache der Bestandsabweichungen sind Qualitätsprobleme und Lieferverzug der Lieferanten. Die fehlenden Daten verhindern jedoch die exakte Quantifizierung im Rahmen des Fallbeispiels.

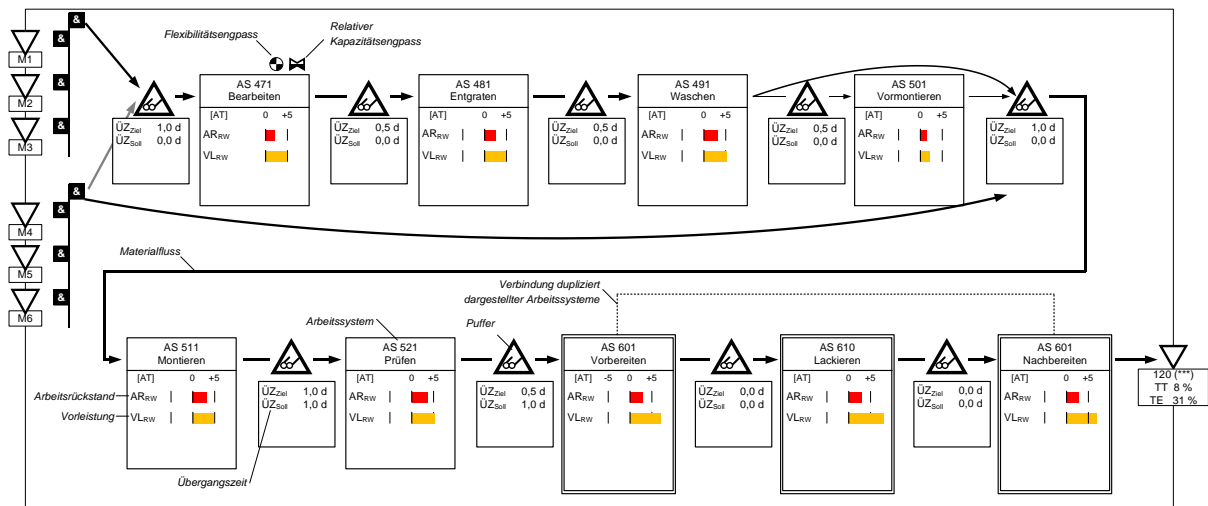
Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass die Aufträge der variantenreichen Module M1, M2 und M3 im Mittel zu früh fertiggestellt wurden. Die Aufträge der variantenarmen Module M4, M5 und M6 werden aufgrund von Lieferantenproblemen nicht rechtzeitig fertig. Die frühzeitige Fertigstellung der Aufträge in den variantenreichen Modulen hat einen hohen Lagerbestand zur Folge. Dieser wirkt jedoch aufgrund der notwendigen Komplettierung vor der Montage mit den zu späten variantenarmen Modulen nicht positiv auf die Termintreue der Montage.

**Priorisierung anhand des Produktnetzes:** Der zu frühe Montagebeginn bei gleichzeitig deutlicher Verspätung der für die Komplettierung notwendigen zuliefernden Module ließe sich nur bei hohen Sicherheitszeiten erklären. Die Sicherheitszeiten der zuliefernden Module betragen jedoch nur einen Arbeitstag, wodurch sich das Verhalten nicht erklären lässt. Aufgrund des zunächst nicht erklärbaren Verhaltens und der logistischen Nähe der Montage (M0) zum Kunden wird diese im Wertstrom detailliert.

#### **7.3.4 Visualisierung und Analyse im Wertstrom**

Der Wertstrom wird nur für diejenigen Module erstellt, bei denen im Produktnetz Auffälligkeiten erkennbar sind, die nicht mit Hilfe des Produktnetzes erklärbar sind. Bild 7.6 zeigt das Ergebnis für das Montage Modul M0, welches nachfolgend, angelehnt an die drei Stufen der Visualisierung, beschrieben wird (vgl. Abs. 5.5.2). Die Legende in Anhang A.3 beschreibt die verwendeten Symbole.





AS: Arbeitssystem AR: Arbeitsrückstand TT: Termintreue TE: Termineinhaltung  
 RW: Reichweite ÜZ: Übergangszeit VL: Vorleistung

**Bild 7.6** Wertstrom des Montagemoduls M0

### Stufe 1: Modulstruktur

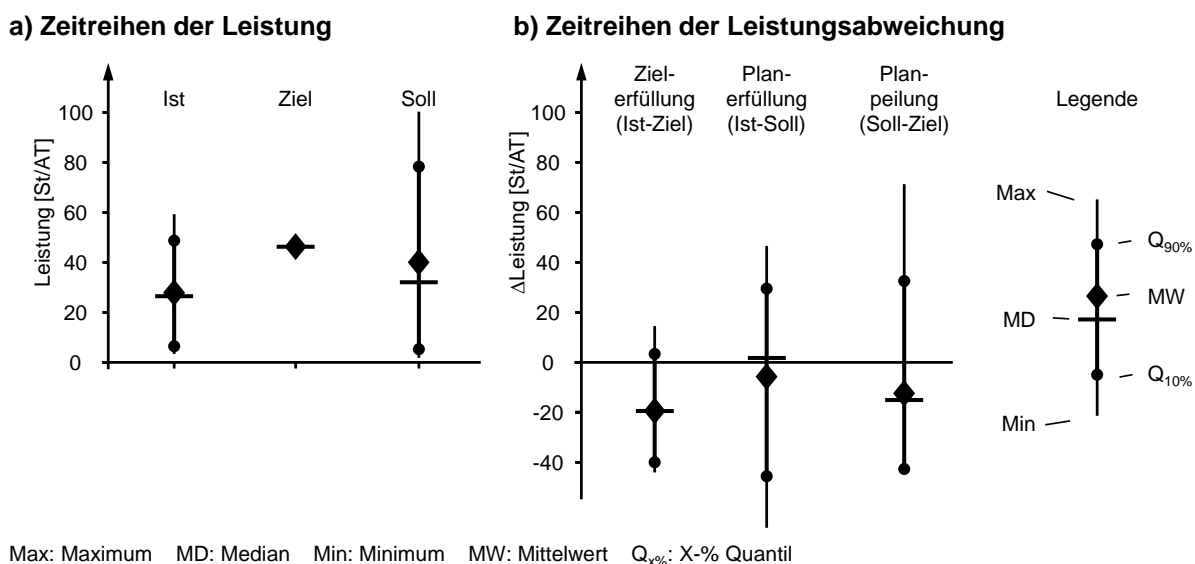
Die Montage der über 100 Varianten erfolgt in neun Arbeitsvorgängen auf acht Arbeitssystemen (AS). Die Vormontage auf AS 501 wird lediglich für ca. 30% des Produktionsvolumens durchgeführt. Die benötigten Arbeitssysteme sind eindeutig dem Modul M0 und dem Segment S1 zugeordnet. Eine Ausnahme bilden das Arbeitssystem Lackierung sowie das zugehörige Arbeitssystem zur Vor- und Nachbereitung: Beide sind mehreren Segmenten und Modulen zugeordnet. Die Arbeitsvorgänge zur Vor- und Nachbereitung der Lackierung sind im ERP-System als ein Arbeitssystem abgebildet. Dies erschwert die arbeitssystembezogene Datenauswertung. Die Reihenfolgesteuerung in den Puffern erfolgt selbständig durch die Mitarbeitenden der einzelnen Arbeitssysteme.

Der Vergleich zwischen den im System hinterlegten und den tatsächlichen Einbauorten der Komponenten erklärt die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Anomalie: Die in den Modulen M4, M5 und M6 produzierten Komponenten werden erst im fünften Schritt an Arbeitssystem AS 511 verbaut. Um den Starttermin des Montagemoduls nicht zu gefährden, werden Arbeitsvorgänge teilweise ohne Produktionsaufträge begonnen und die bereits physisch fertiggestellten Komponenten erst nachträglich den Aufträgen zugeordnet. Aufgrund dieser – nicht im ERP-System abgebildeten Systemeingriffe – ist die Genauigkeit der nachfolgend erhobenen Kennzahlen teilweise ungenügend.

## Stufe 2: Kennzahlen

Zunächst erfolgt die Analyse des Arbeitsrückstands und der Vorleistung wie in Abs. 6.4.3 dargestellt. Anschließend wird die Durchlaufzeit untersucht (Abs. 6.4.4). Da die Buchung der Arbeitsgänge nicht unmittelbar am jeweiligen Arbeitssystem erfolgt, spiegeln die Kennzahlen die tatsächlichen Verhältnisse teils nur verzögert wider.

Wie die Datenbalken in Bild 7.6 zeigen, sind zum Analysezeitpunkt alle Arbeitssysteme des Moduls im Vorlauf, da die Reichweite der Vorleistung größer als die Reichweite des Arbeitsrückstands ist. Die go-see Reihenfolgesteuerung wird als Ursache für die hohe Vorleistung vermutet. Befragungen bestätigen diese Vermutung: Die Einhaltung der Soll-Termine hat geringe Priorität bei der Auswahl der Aufträge. Aufgrund der stets hohen Bestände werden Aufträge nach mit geringem Rüstaufwand bevorzugt ausgewählt.



**Bild 7.7** Leistungsanalyse des AS 511 (Montieren)

Weitere Ursache für Arbeitsrückstand können Leistungsabweichungen der Arbeitssysteme sein. Diese lassen sich mit Hilfe der Kennzahlenanalyse detailliert untersuchen (vgl. Abs. 6.5). Bild 7.7a zeigt die Analyse der drei Zeitreihen für die Leistung der Montage (AS 511):

- Die täglich erreichte Ist-Leistung schwankt relativ stark. Grund dafür sind vor allem die zahlreichen Ausfälle des Arbeitssystems.

- Die von der Produktionsleitung vorgegebene Zielleistung ist im Betrachtungszeitraum konstant. Sie entspricht der Leistung bei ungestörtem Produktionsbetrieb.
- Deutliche Schwankungen weist die über die Planung vorgegebene Soll-Leistung auf. Hauptursache der schwankenden Soll-Leistung ist die Terminierung ohne Kapazitätsprüfung durch das eingesetzte ERP-System.

Über den Vergleich der Zeitreihen der Leistung lassen sich die drei Zeitreihen der Leistungsabweichungen bestimmen (Bild 7.7b):

- Aufgrund der konstanten Zielleistung entspricht die Abweichung der Zielerfüllung exakt der Abweichung der Ist-Leistung.
- Die sich teilweise verstärkende Überlagerung der Schwankungen von Soll- und Ist-Leistung führt zu erheblichen Schwankungen in der Planerfüllung. Diese wirkt sich unmittelbar auf die Rückstandsschwankungen aus.
- Die hohe Schwankung der Planpeilung zeigt, dass die gesteckten Ziele mit der Planungslogik, zumindest bei tagesgenauer Betrachtung, nicht erreichbar sind.

Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass neben der Leistungsabweichung insbesondere die Planung gegen unbegrenzte Kapazität zu starken Schwankungen des Arbeitsrückstands beiträgt. Die hohe mittlere Durchlaufzeitabweichung des Moduls lässt sich jedoch über die Analyse des Arbeitsrückstands nicht erklären. Im nächsten Schritt wird daher die Arbeitssystemdurchlaufzeit näher untersucht (vgl. Abs. 6.4.4).

Auffällig ist insbesondere die geringe Planpeilung der Übergangszeiten. Für die Terminermittlung der Aufträge ist lediglich vor den Arbeitssystemen AS 521 und AS 601 eine Übergangszeit ( $\ddot{U}Z_{\text{Soll}}$ ) vorgesehen. Die Wertstromanalyse ermittelte davon abweichende und aus Sicht der Produktion realistischere Übergangszeiten ( $\ddot{U}Z_{\text{Ziel}}$ ). Die geringen Soll-Übergangszeiten und die hohen Bestände aufgrund der Ziel-Übergangszeiten erklären die hohe mittlere Durchlaufzeitabweichung des Moduls.

Zum Analysezeitpunkt befanden sich alle Arbeitssysteme des Moduls im Vorlauf, dieser Vorlauf müsste in der nächsten Analyseperiode zu einer hohen Termineinhaltung führen. Diese stellte sich jedoch nicht ein. Die Ursache dafür liegt in den weiteren Zeitanteilen der

Auftragsdurchlaufzeit (Abs. 6.4.2): Die Abschlussbuchung eines Produktionsauftrags erfolgt aufgrund qualitätssichernder Maßnahmen durch eine unabhängige Stelle im Unternehmen. Dieser Verantwortungsübergang führt häufig zu einem erheblichen Zeitverzug der Abschlussbuchung und damit zu einer verspäteten Verfügbarkeit der produzierten Artikel im Lager.

Das Fallbeispiel verdeutlicht den iterativen Charakter des Analysevorgehens. Lassen sich die beobachteten Systemzustände mit Hilfe einer Einzelanalyse nicht erklären, werden weitere, vertiefende Einzelanalysen durchgeführt.

### **Stufe 3: Engpasskennzeichnung**

Im Wertstrom sind drei Engpassarten visualisierbar. Im Fallbeispiel vereint das Arbeitssystem AS 471 zwei Engpassarten:

- Das Arbeitssystem besitzt als einziges Arbeitssystem der Herstellkette signifikante Rüstzeiten und bestimmt daher als Flexibilitätsengpass die Losgrößen der gesamten Kette (Abs. 5.3.2).
- Zusätzlich stellt das Arbeitssystem AS 471 den relativen Kapazitätsengpass der Herstellkette dar. Der absolute Kapazitätsengpass wurde nicht ermittelt, da eine Veränderung des Schichtmodells aus organisatorischen Gründen ausgeschlossen wurde (Abs. 5.3.1).

Der Terminengpass wird nicht ausgewiesen, da sich alle Arbeitssysteme im Vorlauf befinden.

**Priorisierung anhand des Wertstroms:** Zunächst sollten die Ursachen der Reihenfolgeabweichungen detailliert analysiert werden, da ein Abweichen von der FIFO-Reihenfolge aufgrund geringer tatsächlicher Rüstzeiten nicht zielführend erscheint. Im nächsten Schritt sollte der Verzug bei der Abschlussbuchung der Aufträge detaillierter untersucht werden, da dieser maßgeblich zur Terminabweichung im Modul beiträgt. Die Auflösung des Kapazitäts- und Flexibilitätsengpasses ist zunächst von nachgelagerter Bedeutung.

### 7.3.5 Ursachenkonsolidierung der Dispositionskomplexität

Die Konsolidierung der Analyseergebnisse erfolgt anhand der günstigen Systemeigenschaften. Aufbauend auf den in Bild 7.8 gezeigten zwölf Systemeigenschaften leitet der Abschnitt Verbesserungsmaßnahmen für Systemeigenschaften mit geringem Erfüllungsgrad ab.

Aspekt Bereich	Systemstruktur		Systemverhalten	
	Struktureller Aspekt	Hierarchischer Aspekt	Funktionaler Aspekt	Entwicklungsbezogener Aspekt
<b>Generell</b>	1) Geringe Objektvielfalt ●	2) Lose Kopplung ●	3) Zuverlässige Funktion ○	4) Kontinuierliche Entwicklung ●
<b>Artikel</b>	5) Geringe Variantenanzahl ●	6) Gezielte Variantenentstehung ●	7) Hohe Qualität ●	8) Produktionsger. Komponententwicklung ●
<b>Arbeitssystem</b>	9) Flexible Auftragsreihenfolge ●	10) Klare Zuordnung ●	11) Flexible Leistungserbringung ●	12) Kontinuierliche Verbesserung ●

Erfüllungsgrad: ○ Ungenügend    ◐ Verbesserungswürdig    ● Ausreichend

**Bild 7.8** Erfüllungsgrad der günstigen Systemeigenschaften der „Zulieferer AG“

**Systemstruktur:** Das untersuchte Produkt-Produktionssystem besteht aus einer überschaubaren Anzahl lose gekoppelter Objekte (1, 2). Der Großteil der insgesamt 100 Varianten entsteht erst innerhalb der Montage (5, 6). Die meisten Arbeitssysteme ermöglichen grundsätzlich eine flexible Auftragsbearbeitung. Eine ungeeignete technische Ausführung der physischen Puffer erschwert jedoch die Einhaltung einer FIFO-Reihenfolge innerhalb der Produktion (9). Die zentrale Lackieranlage sowie die thermische Behandlung verbinden die ansonsten unabhängigen Segmente. Die zentrale Waschanlage verbindet die ansonsten unabhängigen Module des Segments (10).

**Systemverhalten:** Die geringe Zuverlässigkeit einzelner Module stellt ein erhebliches Problem für die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems dar (3). Die ablauf- und aufbauorganisatorische Verankerung der kontinuierlichen Systementwicklung befindet sich noch im Aufbau (4). Fehlerhafte Artikel sind selten und stellen kein grundsätzliches Problem dar

(7). Komponentenentwicklungen werden in Pilotprojekten in separaten Bereichen durchgeführt und auf wenig ausgelasteten Maschinen getestet (8). Über flexiblen Personaleinsatz lassen sich ausfallbedingte Rückstände gezielt abbauen (11). Insbesondere die Erhöhung der Leistungszuverlässigkeit der Arbeitssysteme ist bereits Schwerpunkt der kontinuierlichen Verbesserung (12).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die zentralen Ursachen für die Dispositionskomplexität im ungünstigen Systemverhalten zu finden sind. Lediglich die technisch ungünstige Puffergestaltung trägt als Aspekt der Systemstruktur zur geringen Zielerreichung bei. Ausgehend von der Ursachenanalyse werden primär Maßnahmen zur Verbesserung des Systemverhaltens definiert:

- Durch eine aktivere Steuerung der für die Module M4, M5 und M6 notwendigen Komponenten soll die Servicegrade der zuliefernden Läger deutlich verbessert und damit die Startterminabweichung der Module deutlich reduziert werden.
- Die Übertragung der Zuständigkeit für die Abschlussbuchung an die Produktion sollte die Rückmeldequalität und -geschwindigkeit deutlich verbessern.
- Änderungen an der Planungslogik, beispielsweise die Planung gegen begrenzte Kapazität, sind in Prüfung. Dadurch soll insbesondere die Ermittlung realistischer Sollwerte unterstützt werden.
- Die Verbesserung der Reihenfolgetreue soll durch technische und organisatorische Maßnahmen unterstützt werden.

Die Methode hat den Falsifikationsversuch in der Praxis bestanden. Durch Anwendung der Methode konnten die Ursachen der Dispositionskomplexität auf die logistische Zielerreichung systematisch geprüft und Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. Im Sinne des kritischen Rationalismus können die Ergebnisse somit als vorläufig bestätigt angesehen werden. (Töpfer 2010, S. 55)

### 7.3.6 Aufwand- und Nutzen-Betrachtung

In der industriellen Praxis ist ein günstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis für die Anwendung der Methode von hoher Bedeutung. Der Abschnitt zeigt die Aufwände insbesondere bei der Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie den Nutzen für die Produktionsleitung und die Disposition anhand des Fallbeispiels auf.

Aufwände entstehen insbesondere bei der Datenbeschaffung und -aufbereitung, um Struktur und Verhalten des Systems abzubilden. Im Fallbeispiel wurde SAP/R3 eingesetzt. Der Aufwand bei der Datenbeschaffung ist abhängig von der zugrundeliegenden Klasse:

- **Artikeldaten:** Die logistisch relevanten Informationen zu jedem einzelnen Artikel wie Bedarfsmengen, Losgrößen etc. ließen sich leicht exportieren und auswerten. Aufgrund gut gepflegter Zusatzinformationen wie beispielsweise Art der Baugruppe etc. ließen sich die zentralen Komponentenfamilien halbautomatisch mit geringem Aufwand bilden. Die vollautomatische Auswertung anhand vorhandener Stücklisten erfordert in der Regel hohen Programmieraufwand.
- **Auftragsdaten:** Über das Auftragsinformationssystem in SAP ließen sich die Kopfdaten der Aufträge sowie die Detailinformationen inklusive aller Arbeitsgänge aufwandsarm für die Analyse exportieren. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe einer Tabellenkalkulation. Für die regelmäßige Anwendung ist die Automatisierung der Datenauswertung sinnvoll.
- **Arbeitssystemdaten:** Die Detailplanung der Arbeitssysteme erfolgte außerhalb des ERP-Systems. Die Analyse der Verfügbarkeit der einzelnen Arbeitssysteme und der Planungslogik erfolgte anhand vorhandener Listen. Durch den Einsatz eines MES-Systems kann dieser Aufwand erheblich reduziert werden.

Der Aufbau der Visualisierung erfolgte für die prototypische Anwendung manuell, wobei der Aufwand dabei vergleichbar ist mit einer klassischen Wertstromanalyse. Die tatsächlichen Aufwände zur Ermittlung der Engpässe entsprachen in etwas den Darstellungen in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.5.

Die Aufbereitung der bestehenden Daten ist neben dem systematischen Vorgehen einer der zentralen Vorteile der Methode:

**Neues Problemverständnis durch Perspektivenwechsel:** Die Produktsicht rückt die Produktstruktur und die Terminabweichungen der einzelnen Aufträge in den Vordergrund. Damit tritt die in der Produktion übliche Ausrichtung an der (Voll)Auslastung der Arbeitssysteme zunächst beabsichtigt in den Hintergrund. In Kombination mit den Komplettierungsbedingungen lassen sich die Auswirkungen lokaler Entscheidungen auf die Liefertreue des Gesamtsystems prägnant darstellen.

**Bewusstsein für Bedeutung der IT-Systeme durch Nutzung der Systemdaten:** Die strenge Ausrichtung an der Logik gängiger IT-Systeme, beispielsweise über die konsequente Unterscheidung von Puffern und Lägern, ermöglicht eine exakte Abbildung der im System gespeicherten Daten. Dadurch wird das Bewusstsein für die Einhaltung der Auftragstermine und die vollständige Verbuchung der Aufträge geschärft. Nur im System verbuchte Aufträge werden in der Visualisierung als abgeschlossen dargestellt. Die Methode fördert damit die konsequente digitale Abbildung der logistischen Realität im System.

**Zielgerichtete Priorisierung durch Engpassorientierung:** Die Analyse und Visualisierung der Engpässe ermöglicht die Auswahl kritischer Objekte. Die Differenzierung der Engpassarten erlaubt eine zielgerichtete Ableitung geeigneter Maßnahmen. Ist ein Arbeitssystem beispielsweise Termin-, aber nicht Kapazitätsengpass, liegt der Fokus in der Regel auf der Erhöhung der Reihenfolgedisziplin und nicht auf zusätzlicher Kapazität. Die Ursache-Wirkungs-Diagramme unterstützen systematisch bei der Maßnahmenableitung.

**Fazit:** Die Datenerhebung aus dem bestehenden SAP-System war vor allem für die Auftragsdaten einfach. Der Wechsel der Sichtweise sowie die konsequente Verwendung der Systemdaten zeigte logistisch kritische Abweichungen zwischen Shop-Floor und IT-System deutlich auf. Durch die Methode konnte das Projektteam zielgerichtet Maßnahmen zur unmittelbaren Verbesserung der logistischen Leistung ableiten und priorisieren.



# 8 Abschließende Gesamtbetrachtung

Im komplexen adaptiven Produkt-Produktionssystem eines Unternehmens wirken zahlreiche Einflussfaktoren auf die Disposition und damit auf die zu erreichenden logistischen Ziele. Ziel der Arbeit war es, eine Analysemethode zu entwickeln, die die Identifikation konkreter Ursachen der Dispositionskomplexität im Produkt-Produktionssystem einer wertstromorientierten Variantenfertigung unterstützt. Die Methode soll es ermöglichen, in kurzer Zeit einen grafisch aufbereiteten Überblick über die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Dispositionskomplexität und die relevanten Zusammenhänge des vorliegenden Produkt-Produktionssystems zu geben.

Um eine solche Methode entwickeln zu können, wurden vereinfachende und verkürzende Annahmen über die Realität getroffen. Die kritische Reflexion dient dazu, die Methode hinsichtlich ihres theoretischen und pragmatischen Nutzens abschließend zu beurteilen (Töpfer 2010, S. 52). Darauf aufbauend werden anschließend weitere mögliche Forschungsfelder aufgezeigt.

## 8.1 Kritische Reflexion

Bestehende Ansätze konzentrieren sich in der Regel auf die Verbesserung der Struktur oder des Verhaltens von Produkt oder Produktion. Diese Arbeit betrachtet Struktur und Verhalten in einem gemeinsamen Produkt-Produktionssystem und verknüpft damit bisher relativ unabhängige Forschungsgebiete. Theoretische Grundlage ist die Systemtheorie. Zur Systembeschreibung verwendet die Arbeit die drei bestehenden Aspekte (Struktur, Hierarchie, Funktion) und ergänzt diese um einen weiteren Aspekt (Entwicklung).

Die Arbeit baut auf der Wertstromanalyse und dem Trichtermodell auf, um ein Grundmodell des Produkt-Produktionssystems mit den zentralen Klassen Artikel, Auftrag und Ar-

beitssystem zu beschreiben. In der Arbeit wird eine strenge Unterscheidung in artikelbezogene Läger und auftragsbezogene Puffer eingeführt. Dies soll die Anknüpfung an, in der Praxis bestehende, IT-Systeme und die darauf aufbauenden Datenauswertungen vereinfachen.

In der Arbeit wird das untersuchte System unter Berücksichtigung technischer und logistischer Eigenschaften in Segmente und Module gegliedert. Dabei wird eine wertstromorientierte Strukturierung der Produktion in relativ unabhängige Segmente und Module unterstellt. Insbesondere bei einer werkstattorientierten Strukturierung mit zahlreichen Abhängigkeiten stößt das Vorgehen zur Systemgliederung an Grenzen.

Ausgehend von den vier Aspekten des Systems sowie den drei grundlegenden Klassen werden zwölf günstige Systemeigenschaften synthetisiert, die die soll-zustandsorientierte Analyse und darauf aufbauend die Maßnahmenableitung unterstützen. Die günstigen Eigenschaften lassen sich nicht immer unmittelbar einer einzelnen Kennzahl zuordnen, unterstützen in der Praxis jedoch die verdichtete Kommunikation der Ergebnisse und Maßnahmen.

Die Visualisierung des Systems erfolgt im neu entwickelten Produktnetz und dem erweiterten Wertstrom. Das Produktnetz mit unterbrochener Zeitachse ermöglicht es, Struktur und logistisches Verhalten variantenreicher Produkte gleichzeitig darzustellen. Bei Produkten mit hohem Anteil an Mehrfachverwendungen oder nicht konvergierenden Strukturen kann die Darstellung die beabsichtigte Übersichtlichkeit verlieren.

Die Untersuchung der Ursachen der Dispositionskomplexität in Struktur und Verhalten wird in zehn Einzelanalysen durchgeführt. Die Strukturanalysen konzentrieren sich auf die für die Leistungserbringung zentralen Arbeitssysteme und untersuchen deren Ausfallrisiko und Vernetzung. Eine explizite Analyse der Ausfallrisiken und der Vernetzung aus Produktsicht erfolgt nicht.

Schwerpunkte der Verhaltensanalyse bilden die beiden logistischen Dimensionen Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit für Artikel, Aufträge und Arbeitssysteme. Die systematische Überprüfung der Einflüsse erfolgt mit Ursache-Wirkungs-Diagrammen. Schwerpunkt

der Arbeit ist damit die Identifikation, Quantifizierung und Priorisierung einzelner Ursachengruppen. Die Untersuchung vernetzter Ursachen (z.B. mit Hilfe von Korrelationsanalysen) erfolgt nicht.

Die Prüfung der Arbeit erfolgt theoretisch und empirisch. Die theoretische Prüfung der entwickelten Methode auf innere Konsistenz zeigte die vollständige Überprüfbarkeit der günstigen Systemeigenschaften mit Hilfe der entwickelten Analysen und Visualisierungen. Die Prüfung der Methode anhand eines unabhängigen Anforderungskatalogs ergab für den Bereich der Systemanalyse keine offenen Punkte. Die empirische Prüfung an einem Fallbeispiel aus der Fahrzeugindustrie zeigt die Praxistauglichkeit der Methode sowie die starke Verbindung zum verwendeten Grundmodell. Weicht die reale Produktion vom Modell ab (z.B. aufgrund verzögerter Buchungen), treten Zustände auf, die anhand des Modells nicht erklärbar sind. Dadurch sinkt die Aussagekraft der Analysen teils deutlich.

Zusammenfassend erfüllt die Methode alle in Abschnitt 4.1 identifizierten Anforderungen. Mit Hilfe der Methode lassen sich die Dispositionskomplexität in der wertstromorientierten Variantenfertigung damit geeignet analysieren und visualisieren.

## 8.2 Ausblick

Ausgehend von der kritischen Reflexion ist die gestellte Forschungsfrage beantwortet. Weitere Forschungsaktivitäten ergeben sich insbesondere durch die Erweiterung oder Auflösung getroffener Einschränkungen.

Die Methode wurde für die wertstromorientierte Variantenfertigung entwickelt. Die Strukturierung des betrachteten Produkt-Produktionssystems erfolgt anhand bestehender Muster und Klassifikationen im Top-down-Vorgehen. Dadurch kann leicht an bestehendes Anwenderwissen angeknüpft werden. Ein Bottom-up-Vorgehen, unterstützt durch mathematisch-statistische Methoden wie beispielsweise die Cluster- oder Graphenanalyse, könnte bisher unbekannte Strukturen und Zusammenhänge identifizieren und sollte künftig näher untersucht werden. Eine Anpassung der Methode an weitere Fertigungstypen (beispielsweise Einzelfertiger) mit alternativen Organisationsformen (beispielsweise Matrix-Produktion) ist vorstellbar.

Auftragsannahme und -erzeugung sind nicht Teil der Arbeit. Eingangsgröße sind vollständig spezifizierte und terminierte Kunden- und Herstelleraufträge, wobei sich die Analyse auf die Ziel-, Ist- und Sollwerte der Kennzahlen konzentriert. Die Einführung eines zusätzlichen Terminkreises zur detaillierten Analyse der Plan-Werte ist insbesondere bei turbulenten Abweichungen in der Planerfüllung sinnvoll.

Die Auftragsannahme wird nur hinsichtlich der Liefertermine untersucht. Die Erweiterung der Methode um quantitative Einzelanalysen in Richtung Produktionsplanung, Vertrieb oder Beschaffung ist daher naheliegend. Insbesondere der Übergang von der regelkreisbasierten internen Dispositionssicht hin zur verhandlungsorientierten externen Kundensicht stellt eine methodische Herausforderung dar.

Die erarbeitete Methode beschreibt ein Vorgehen für die Analysephase des Systems Engineerings. Darauf aufbauend sollten als Nächstes eine Methode zur geeigneten Systemgestaltung und -verbesserung sowie zur Durchführung solcher Veränderungen entwickelt werden. Neben den tendenziell kurzfristig angelegten logistischen Zielen (Exploitation) sollten bei der Systemgestaltung verstärkt auch langfristige Ziele (Exploration) sowie daraus resultierenden finanziellen Auswirkungen untersucht werden.

# Literaturverzeichnis

## **Alkan et al. 2018**

Alkan, Bugra; Vera, Daniel A.; Ahmad, Mussawar; Ahmad, Bilal; Harrison, Robert, 2018. Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European Journal of Industrial Engineering* **12** (1), S. 116  
DOI: 10.1504/EJIE.2018.089883

## **APICS 2017**

APICS (2017). *SCOR Supply Chain Operations Reference Model: Version 12.0*. Chicago, USA

## **Ashby 1957**

Ashby, W. Ross, 1957. *An Introduction to Cybernetics*. Second Impression. London: Chapman & Hall  
ISBN: 978-1-614-27765-1

## **Axelrod et al. 2000**

Axelrod, Robert; Cohen, Michael D., 2000. *Harnessing complexity: Organizational implications of a scientific frontier*. New York: Basic Books  
ISBN: 0-465-00550-0

## **Backhaus et al. 2018**

Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf, 2018. *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 15., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Gabler  
ISBN: 978-3-662-56654-1  
DOI: 10.1007/978-3-662-56655-8

## **Bahill et al. 2008**

Bahill, A. Terry; Botta, Rick, 2008. Fundamental Principles of Good System Design. *Engineering Management Journal* **20** (4), S. 9–17  
DOI: 10.1080/10429247.2008.11431783

**Balzert 1999**

Balzert, Heide, 1999. *Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf*. Heidelberg: Spektrum  
ISBN: 3-8274-0285-9

**Barthel 2006**

Barthel, Holger, 2006. *Modell zur Analyse und Gestaltung des Bestellverhaltens für die variantenreiche Serienproduktion*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und Praxis, 449  
Stuttgart, Univ., Diss., 2006  
ISBN: 978-3-939890-02-7

**Bar-Yam 2006**

Bar-Yam, Yaneer, 2006. Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering. In: Braha, Dan (Hrsg.): *Complex engineered systems. Science meets technology*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 22–39  
ISBN: 3-540-32831-9

**Bauernhansl et al. 2014**

Bauernhansl, Thomas; Schatz, Anja; Jäger, Jens, 2014. Komplexität bewirtschaften – Industrie 4.0 und die Folgen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **109** (5), S. 347–350  
DOI: 10.3139/104.111140

**Bauernhansl et al. 2016**

Bauernhansl, Thomas; Dombrowski, Uwe (Hrsg.), 2016. *Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung*, TU Braunschweig. Braunschweig  
ISBN: 978-3-946916-01-7  
urn:nbn:de:0011-n-4290076

**Bauernhansl 2017**

Bauernhansl, Thomas, 2017. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 4*. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–31  
ISBN: 978-3-662-53253-9

**Bauernhansl 2021**

Bauernhansl, Thomas (Hrsg.), 2021. *Ganzheitliche Produktionssysteme 4.0*, Fraunhofer IPA. Stuttgart  
urn:nbn:de:0011-n-6339259

**Bechte 1984**

Bechte, Wolfgang, 1984. *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Düsseldorf: VDI Verlag  
Hannover, Univ., Diss., 1980

**Beer 1970**

Beer, Stafford, 1970. Managing modern complexity. *Futures* **2** (3), S. 245–257  
DOI: 10.1016/0016-3287(70)90028-5

**Beer 1979**

Beer, Stafford, 1979. *The Heart of Enterprise*. Chichester: Wiley. Verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley031/95150366.html>  
ISBN: 0-471-27599-3

**Beer 2015**

Beer, Jakob Emanuel (2015). *Analysis and Management of Bottlenecks in Supply Networks*. Stavanger, University of Stavanger  
Stavanger, University, Diss., 2015, 2015. Verfügbar unter:  
<http://hdl.handle.net/11250/285014>  
Zugriff am: 01.06.2022

**Berg et al. 2013**

Berg, T.; Pooley, R., 2013. Rich Pictures: Collaborative Communication Through Icons. *Systemic Practice and Action Research* **26** (4), S. 361–376  
DOI: 10.1007/s11213-012-9238-8

**Bertalanffy 1968**

Bertalanffy, Ludwig von, 1968. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller

**Bertalanffy 1972**

Bertalanffy, Ludwig von, 1972. Zu einer allgemeinen Systemlehre. In: Bleicher, Knut (Hrsg.): *Organisation als System*. Wiesbaden: Gabler  
ISBN: 978-3-409-31912-6

**Bohl 2015**

Bohl, Arne, 2015. *Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität*. Aachen: Apprimus. Ergebnisse aus der Produktionstechnik, 2015-8  
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015  
ISBN: 978-3-86359-326-1

**Bohne 1998**

Bohne, Fabian, 1998. *Komplexitätskostenmanagement in der Automobilindustrie: Identifizierung und Gestaltung vielfaltsinduzierter Kosten*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag  
Augsburg, Univ., Diss., 1998  
ISBN: 978-382446-856-0  
DOI: 10.1007/978-3-663-08643-7

**Braha 2006**

Braha, Dan (Hrsg.), 2006. *Complex engineered systems: Science meets technology*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer  
ISBN: 3-540-32831-9



**Brecher 2011**

Brecher, Christian (Hrsg.), 2011. *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-642-20692-4

**Brinton 1914**

Brinton, Willard C., 1914. *Graphic Methods for Presenting Facts*. New York: The Engineering Magazine Company

**Brosch 2014**

Brosch, Max, 2014. *Eine Methode zur Reduzierung der produktvarianteninduzierten Komplexität*. Hamburg: TuTech. Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, 7  
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2014  
ISBN: 978-3-941492-82-0

**Browne et al. 1984**

Browne, Jim; Dubois, Didier; Rathmill, Keith; Sethi, Suresh P.; Stecke, Kathryn E., 1984. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine* (April), S. 114–117

**Brüggemann et al. 2020**

Brüggemann, Holger; Bremer, Peik, 2020. *Grundlagen Qualitätsmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien  
ISBN: 978-3-658-28779-5  
DOI: 10.1007/978-3-658-28780-1

**Budde 2016**

Budde, Lukas, 2016. *Integriertes Komplexitätsmanagement in produzierenden Unternehmen: ein Modell zur Bewertung von Komplexität*  
St. Gallen, Univ., Diss., 2016  
urn:nbn:ch:bel-835585

**Busse 2013**

Busse, Tim Daniel, 2013. *Modellbasierte Bewertung der Belastungsstreuung auf das logistische Systemverhalten*. Garbsen: PZH-Verlag. Berichte aus dem IFA, 2013-6

Hannover, Univ., Diss., 2013

ISBN: 978-3-944-58628-1

**Caldarelli et al. 2016**

Caldarelli, Guido; Chessa, Alessandro, 2016. *Data science and complex networks: Real cases studies with Python*. Oxford: Oxford University Press

ISBN: 978-0-19-963960-1

**Checkland 1975**

Checkland, P. B., 1975. The Development of Systems Thinking by Systems Practice - a Methodology from an Action Research Program. In: Trappl, Robert (Hrsg.): *Progress in Cybernetics and Systems Research*. Washington, D.C.: Hemisphere (A Halsted Press book), S. 278–283

ISBN: 978-047088-476-8

**Cilliers 1998**

Cilliers, Paul, 1998. *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. London, New York: Routledge

ISBN: 0-203-01225-9

**Corsten et al. 2009**

Corsten, Hans; Gössinger, Ralf, 2009. *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg

ISBN: 978-3-486-58751-7

**Crawley et al. 2016**

Crawley, Edward; Cameron, Bruce; Selva, Daniel, 2016. *System Architecture: Strategy and Product Development for Complex Systems*. Global Edition. Edinburgh: Pearson  
ISBN: 978-1-292-11084-4

**Crosby 1980**

Crosby, Philip B., 1980. *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*. New York: Penguin  
ISBN: 0-421-62585-4

**Davis 1987**

Davis, Stanley M., 1987. *Future perfect*. Reading, Mass.: Addison-Wesley  
ISBN: 0-201-11513-1

**Deistler et al. 2018**

Deistler, Manfred; Scherrer, Wolfgang, 2018. *Modelle der Zeitreihenanalyse*. Cham: Birkhäuser. Mathematik Kompakt  
ISBN: 978-3-319-68663-9

**Deming 2000**

Deming, William Edwards, 2000. *Out of the crisis*. 1. MIT Press edition. Cambridge, Mass.: The MIT Press  
ISBN: 0-262-54115-7

**Diestel 2006**

Diestel, Reinhard, 2006. *Graphentheorie*. 3. Auflage. Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-364214-911-5

**DIN 32705**

DIN 32705:1987. *Klassifikationssysteme*

**DIN 66001**

DIN 66001:1966. *Sinnbilder für Datenfluß- und Programmablaufpläne*

**DIN EN ISO 10209**

DIN EN ISO 10209:2012. *Technische Produktdokumentation*

**Dombrowski et al. 2015**

Dombrowski, Uwe; Mielke, Tim (Hrsg.), 2015. *Ganzheitliche Produktionssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-662-46163-1

**Dombrowski et al. 2016**

Dombrowski, Uwe; Richter, Thomas, 2016. Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **111** (12), S. 771–774  
DOI: 10.3139/104.111651

**Domschke et al. 2010**

Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin, 2010. *Logistik: Rundreisen und Touren*. 5. Auflage. München: Oldenbourg  
ISBN: 978-348659-093-7  
DOI: 10.1524/9783486709971

**Dyckhoff 2006**

Dyckhoff, Harald, 2006. *Produktionstheorie*. 5., überarbeitete Auflage. Berlin: Springer  
ISBN: 978-3-540-32600-7

**Dyckhoff et al. 2010**

Dyckhoff, Harald; Spengler, Thomas S., 2010. *Produktionswirtschaft*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-642-13683-2  
DOI: 10.1007/978-3-642-13684-9

**Efthymiou et al. 2016**

Efthymiou, K.; Mourtzis, D.; Pagoropoulos, A.; Papakostas, N.; Chryssolouris, George, 2016. Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **29** (9), S. 1025–1044

DOI: 10.1080/0951192X.2015.1130245

**Eidenmüller 1995**

Eidenmüller, Bodo, 1995. *Die Produktion als Wettbewerbsfaktor: Das Potential der Mitarbeiter nutzen - Herausforderung an das Produktionsmanagement*.

3. aktualisierte und erweiterte Auflage. Köln: TÜV Rheinland

ISBN: 3-82490-181-1

**ElMaraghy et al. 2012**

ElMaraghy, Waguih; ElMaraghy, Hoda; Tomiyama, Tetsuo; Monostori, Laszlo, 2012. Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **61** (2), S. 793–814

DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.001

**Erlach 2010**

Erlach, Klaus, 2010. *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-540-89867-2

**Erlach 2020**

Erlach, Klaus, 2020. *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. 3. Auflage. Berlin: Springer

ISBN: 978-3-662-58906-9

**Erlach et al. 2020**

Erlach, Klaus; Böhm, Markus; Hartleif, Silke; Leipoldt, Christoph; Ungern-Sternberg, Roman, 2020. Gestaltungsrichtlinien in den Technikwissenschaften. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **115** (1-2), S. 77–81

DOI: 10.3139/104.112206

**Erlach et al. 2021**

Erlach, Klaus; Berchtold, Marc-André; Gessert, Stephan; Kaucher, Christian; Leopoldt, Christoph; Ungern-Sternberg, Roman, 2021. Konzeptionelle Vorstudien in der Fabrikplanung: Ein methodischer Gestaltungsansatz basierend auf dem Systems Engineering. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **116** (1-2), S. 39–43

DOI: 10.1515/zwf-2021-0008

**Feldhusen et al. 2013**

Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.), 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-642-29568-3

**Feldmann et al. 2008**

Feldmann, Klaus; Schmuck, T.; Brossog, M.; Dreyer, Jens, 2008. Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen. *Werkstattstechnik online* **98** (3), S. 156–162

**Focke et al. 2018**

Focke, Markus; Steinbeck, Jörn, 2018. *Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management*. Wiesbaden: Springer Gabler

ISBN: 978-3-658-21455-5

DOI: 10.1007/978-3-658-21456-2

**Forno et al. 2014**

Forno, Ana Julia Dal; Pereira, Fernando Augusto; Forcellini, Fernando Antonio; Kipper, Liane M., 2014. Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **72** (5-8), S. 779–790

DOI: 10.1007/s00170-014-5712-z

**Forrester 1958**

Forrester, Jay W., 1958. Industrial Dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review* **36** (July-August), S. 37–66

**Fricke et al. 2005**

Fricke, Ernst; Schulz, Armin P., 2005. Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. *Systems Engineering* **8** (4), S. 342–359

DOI: 10.1002/sys.20039

**Fricker 1996**

Fricker, Achim Roland, 1996. *Eine Methodik zur Modellierung, Analyse und Gestaltung komplexer Produktionsstrukturen*. Aachen: Verlag der Augustinus-Buchhandlung. Aachener Beiträge zu Humanisierung und Rationalisierung, 27 Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1996

ISBN: 3-86073-457-1

**Gell-Mann 1995**

Gell-Mann, Murray, 1995. What is complexity?: Remarks on simplicity and complexity by the Nobel Prize-winning author of *The Quark and the Jaguar*. *Complexity* **1** (1), S. 16–19

DOI: 10.1002/cplx.6130010105

**Gell-Mann 1999**

Gell-Mann, Murray, 1999. Complex Adaptive Systems. In: Cowan, George A.; Pines, David; Meltzer, David Elliott (Hrsg.): *Complexity*. Metaphors, Models, and Reality. Cambridge, Mass: Perseus Books, 17-45

ISBN: 0-7382-0232-0

**Gigerenzer 2015**

Gigerenzer, Gerd, 2015. *Simply rational: Decision making in the real world*. New York, NY: Oxford University Press

ISBN: 978-019939-007-6

**Gilmore et al. 1997**

Gilmore, James H.; Pine, B. Joseph, 1997. The Four Faces of Mass Customization. *Harvard Business Review* **75** (1), S. 91–101

**Goldratt et al. 2001**

Goldratt, Eliyahu M.; Cox, Jeff, 2001. *Das Ziel: Ein Roman über Prozessoptimierung*. Frankfurt am Main: Campus  
ISBN: 3-59336-701-7

**Große-Heitmeyer et al. 2004a**

Große-Heitmeyer, Volker; Wiendahl, Hans-Peter, 2004. Einführung. In: Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage*. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–17  
ISBN: 978-3-642-62372-1

**Große-Heitmeyer et al. 2004b**

Große-Heitmeyer, Volker; Wiendahl, Hans-Peter, 2004. Grundansatz des Produktionsstufenkonzepts. In: Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage*. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 21–40  
ISBN: 978-3-642-62372-1

**Grossmann 1992**

Grossmann, Christoph, 1992. *Komplexitätsbewältigung im Management: Anleitungen, integrierte Methodik und Anwendungsbeispiele*. Winterthur: GNC  
St. Gallen, Hochsch., Diss., 1992  
ISBN: 3-95203-410-X



**Günther et al. 2019**

Günther, Lisa C.; Colangelo, Eduardo; Wiendahl, Hans-Hermann; Bauer, Christian, 2019. Data quality assessment for improved decision-making: a methodology for small and medium-sized enterprises. *Procedia Manufacturing* **29**, S. 583–591

DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.114

**Haberfellner et al. 2015**

Haberfellner, Reinhard; Weck, Olivier de; Fricke, Ernst; Vössner, Siegfried (Hrsg.), 2015. *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung*. 13., aktualisierte Auflage. Zürich: Orell Füssli

ISBN: 978-3-280-04068-3

**Hayek 1972**

Hayek, Friedrich A. von, 1972. *Die Theorie komplexer Phänomene*. Tübingen: Mohr. Vorträge und Aufsätze / Walter-Eucken-Institut, 36

ISBN: 3-16333-691-4

**Heinen et al. 2008**

Heinen, Tobias; Rimpau, Christoph; Wörn, Arno, 2008. Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, Peter (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 19–32

ISBN: 978-3-939026-96-9

**Heinicke 2017**

Heinicke, Matthias, 2017. *Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen*

Magdeburg, Univ., Diss., 2017

DOI: 10.25673/5255

**Hichert et al. 2022**

Hichert, Rolf; Faisst, Jürgen (Hrsg.), 2022. *International Business Communication Standards*. Version 1.2. Hilden: IBCS Media  
ISBN: 978-3-9821414-2-8

**Holland 1992**

Holland, John H., 1992. Complex Adaptive Systems. *Daedalus* **121** (1), S. 17–30

**Holland 2006**

Holland, John H., 2006. Studying Complex Adaptive Systems. *Journal of Systems Science and Complexity* **19** (1), S. 1–8  
DOI: 10.1007/s11424-006-0001-z

**Holstein 1968**

Holstein, William K., 1968. Production planning and control integrated. *Harvard Business Review* **46** (May-June), S. 121–140

**Hopp et al. 2011**

Hopp, Wallace J.; Spearman, Mark L., 2011. *Factory Physics*. 3rd ed. Long Grove, Ill: Waveland Press  
ISBN: 978-157766-739-1

**Horváth et al. 2015**

Horváth, Péter; Gleich, Ronald; Seiter, Mischa, 2015. *Controlling*. 13., komplett überarbeitete Auflage. München: Vahlen  
ISBN: 978-380064-954-9  
DOI: 10.15358/9783800649556

**Jacobsen 2006**

Jacobsen, Arne Erik, 2006. *Messung und Bewertung von Nachfragedynamik und logistischer Agilität in der Automobilzulieferindustrie*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum. Berichte aus dem IFA, 2006-3  
Hannover, Univ., Diss., 2006  
ISBN: 978-393902-627-3

**Jäger et al. 2014**

Jäger, Jens; Kluth, Andreas; Schatz, Anja; Bauernhansl, Thomas, 2014. Complexity Patterns in the Advanced Complexity Management of Value Networks. *Procedia CIRP* **17**, S. 645–650

DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.070

**Jäger et al. 2016**

Jäger, Jens; Schöllhammer, Oliver; Lickefett, Michael; Bauernhansl, Thomas, 2016. Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the “Industrie 4.0” Complexity for Small and Medium Enterprises. *Procedia CIRP* **57**, S. 116–121

DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.021

**Jockisch et al. 2009**

Jockisch, Maike; Rosendahl, Jens, 2009. Klassifikation von Modellen. In: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (Hrsg.): „*Das ist gar kein Modell!*“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler, S. 23–52

ISBN: 978-3-8349-1842-0

**Jones 2014**

Jones, Kennie H., 2014. Engineering Antifragile Systems: A Change In Design Philosophy. *Procedia Computer Science* **32**, S. 870–875

DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.504

**Kahneman 2012**

Kahneman, Daniel, 2012. *Thinking, fast and slow*. London: Penguin Books

ISBN: 978-014103-357-0

**Kelly 1997**

Kelly, Kevin, 1997. *Das Ende der Kontrolle: Die biologische Wende in Wirtschaft, Technik und Gesellschaft*. Mannheim: Bollmann

ISBN: 3-927901-87-3

**Kersten et al. 2017**

Kersten, Wolfgang; Seiter, Mischa; See, Birgit von; Hackius, Niels; Maurer, Timo, 2017. *Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management: Chancen der digitalen Transformation*. Hamburg: DVV Media Group  
ISBN: 978-3-87154-607-5

**Kersten et al. 2020**

Kersten, Wolfgang; See, Birgit von; Lodemann, Sebastian, 2020. *Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management: Entwicklungen und Perspektiven einer nachhaltigen und digitalen Transformation*. Bremen: BVL.digital  
ISBN: 978-3-00-066276-8

**Kipp et al. 2008**

Kipp, Thomas; Krause, Dieter, 2008. Design for Variety - Efficient Support for Design Engineers. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (Hrsg.): *10th International Design Conference Design 2008, 19.-22. May 2008, Cavtat - Dubrovnik, Croatia*. Proceedings. Zagreb, S. 425–432  
ISBN: 978-953-6313-89-1

**Kipp 2012**

Kipp, Thomas, 2012. *Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung*. Hamburg: TuTech. Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, 2012-4  
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2012  
ISBN: 978-3-941492-47-9  
DOI: 10.15480/882.1088

**Klein et al. 2011**

Klein, Robert; Scholl, Armin, 2011. *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. 2. Auflage. München: Vahlen  
ISBN: 3-8006-3884-3

**Knoepfel 1920**

Knoepfel, Charles Edward, 1920. *Graphic production control*. New York: The Engineering Magazine Company  
Zugriff am: 29.11.2022

**Knössl 2013**

Knössl, Tobias, 2013. Logistikorientierte Wertstromanalyse. In: Günthner, Willibald A.; Boppert, Julia (Hrsg.): *Lean Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 135–144  
ISBN: 978-3-642-37325-1

**Koch 2008**

Koch, Arno, 2008. *OEE für das Produktionsteam: Das vollständige OEE-Benutzerhandbuch oder wie Sie die verborgene Maschine entdecken*. Ansbach: CETPM. Operational excellence, 5  
ISBN: 978-394077-504-7

**Koch 2018**

Koch, Christoph, 2018. *Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger* Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2018  
DOI: 10.15480/882.1971

**Kohlhammer et al. 2018**

Kohlhammer, Jörn; Proff, Dirk U.; Wiener, Andreas, 2018. *Visual Business Analytics: Effektiver Zugang zu Daten und Informationen*. 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag  
ISBN: 978-386490-410-3

**Köster 1998**

Köster, Oliver, 1998. *Komplexitätsmanagement in der Industrie: Kundennähe und Effizienz in der Leistungserstellung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag  
St. Gallen, Univ., Diss., 1998 u.d.T.: Köster, Oliver Strategische Disposition  
ISBN: 3-82440-401-X

**Kötter et al. 2016**

Kötter, Wolfgang; Schwarz-Kocher, Martin; Zanker, Christoph (Hrsg.), 2016. *Balanced GPS: Ganzheitliche Produktionssysteme mit stabil-flexiblen Standards und konsequenter Mitarbeiterorientierung*. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler  
ISBN: 978-365803-514-3

**Krause et al. 2018**

Krause, Dieter; Gebhardt, Nicolas, 2018. *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin: Springer Vieweg  
ISBN: 978-3-662-53040-5  
DOI: 10.1007/978-3-662-53040-5

**Langley 1995**

Langley, Ann, 1995. Between "Paralysis by Analysis" and "Extinction by Instinct". *Sloan Management Review* **36** (Spring), S. 63–76

**Lee et al. 1997a**

Lee, Hau L.; Padmanabhan, V.; Whang, Seungjin, 1997. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science* **43** (4), S. 546–558

**Lee et al. 1997b**

Lee, Hau L.; Padmanabhan, V.; Whang, Seungjin, 1997. The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review* **38** (3), S. 93–102

**Liker et al. 2006**

Liker, Jeffrey K.; Meier, David, 2006. *The Toyota Way fieldbook: A practical guide for implementing Toyota's 4Ps*. New York, N.Y.: McGraw Hill  
ISBN: 978-007-1448-932

**Lödding 2016**

Lödding, Hermann, 2016. *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg  
ISBN: 978-3-662-48458-6  
DOI: 10.1007/978-3-662-48459-3

**Luckert 2018**

Luckert, Melanie, 2018. *Potenzial der Fertigungssegmentierung zur Erhöhung der produktionslogistischen Leistungsfähigkeit*. Aachen. Ergebnisse aus der Produktionstechnik, 38  
Aachen, Univ., Diss., 2018  
ISBN: 978-386359-671-2

**Lugert et al. 2018**

Lugert, Andreas; Batz, Aglaya; Winkler, Herwig, 2018. Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. *Journal of Manufacturing Technology Management* **29** (5), S. 886–906  
DOI: 10.1108/JMTM-11-2017-0236

**Lugert 2019**

Lugert, Andreas, 2019. *Dynamisches Wertstrommanagement im Kontext von Industrie 4.0*. Anwendungsorientierte Beiträge zum industriellen Management, 9  
Cottbus-Senftenberg, Univ., Diss., 2019  
ISBN: 978-383254-849-0

**Luz et al. 2021**

Luz, Gabriel Preuss; Tortorella, Guilherme Luz; Narayanamurthy, Gopalakrishnan; Gaiardelli, Paolo; Sawhney, Rapinder, 2021. A systematic literature review on the stochastic analysis of value streams. *Production Planning & Control* **32** (2), S. 121–131  
DOI: 10.1080/09537287.2020.1713414

**Malik 1996**

Malik, Fredmund, 1996. *Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme*. 5., erweiterte und ergänzte Auflage. Bern: Haupt  
Teilw.: St. Gallen, Hochsch., Habil., 1977  
ISBN: 3-25805-369-3

**March 1991**

March, James G., 1991. Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science* **2** (1), S. 71–87  
DOI: 10.1287/orsc.2.1.71

**Mather et al. 1978**

Mather, Hal; Plossl, George, 1978. Priority Fixation Versus Throughput Planning. *Production and inventory management* **19** (3), S. 27–51

**McKinney 2014**

McKinney, Wes, 2014. *Python for data analysis*. Beijing: O'Reilly  
ISBN: 978-1-449-31979-3

**McKinney et al. 2020**

McKinney, Wes; Pandas Development Team (2020). *pandas: powerful Python data analysis toolkit*: Release 1.0.3. Verfügbar unter: <https://pandas.pydata.org/docs/pandas.pdf>  
Zugriff am: 01.06.2022

**Meise 2001**

Meise, Volker, 2001. *Ordnungsrahmen zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. Modelle für das Management komplexer Reorganisationsprojekte*. Hamburg: Dr. Kovac. Studien zur Wirtschaftsinformatik, 10  
Münster, Univ., Diss., 2000  
ISBN: 978-383000-354-0



**Minai et al. 2006**

Minai, Ali A.; Braha, Dan; Bar-Yam, Yaneer, 2006. Complex Engineered Systems: A New Paradigm. In: Braha, Dan (Hrsg.): *Complex engineered systems. Science meets technology*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 1–21  
ISBN: 3-540-32831-9

**Monden 2012**

Monden, Yasuhiro, 2012. *Toyota production system: An integrated approach to just-in-time*. 4. edition. Boca Raton, FL: CRC Press  
ISBN: 978-143982-097-1

**Mühlenbruch 2004**

Mühlenbruch, Helge, 2004. Technologie. In: Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage*. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 43–65  
ISBN: 978-3-642-62372-1

**Nadler 1969**

Nadler, Gerald, 1969. *Arbeitsgestaltung - zukunftsbewußt: Entwerfen und Entwickeln von Wirksystemen*. München: Carl Hanser

**Nakajima 1988**

Nakajima, Seiichi, 1988. *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Cambridge, Mass.: Productivity Press  
ISBN: 0-91529-923-2

**Neis 2015**

Neis, Jan, 2015. *Analyse der Produktportfoliokomplexität unter Anwendung von Verfahren des Data Mining*: Shaker. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, 21  
Aachen, RWTH, Diss., 2015  
ISBN: 978-384404-120-0

**Nußbaum 2011**

Nußbaum, Christopher Lee, 2011. *Modell zur Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität*. Aachen: Apprimus. Ergebnisse aus der Produktionstechnik, 10

Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2011

ISBN: 978-386359-023-9

**Nyhuis et al. 2008**

Nyhuis, Peter; Pachow-Frauenhofer, Julia, 2008. Grundlagen der Produktionslogistik. In: Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Auflage, S. 295–307

ISBN: 978-3-540-72928-0

**Nyhuis 2008**

Nyhuis, Peter (Hrsg.), 2008. *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-540-75641-5

**Nyhuis et al. 2012**

Nyhuis, Peter; Wiendahl, Hans-Peter, 2012. *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg

ISBN: 978-354092-839-3

**Nywlt 2015**

Nywlt, Johannes, 2015. *Logistikorientierte Positionierung des Kundenauftragsentkopplungspunktes*. Garbsen: TEWISS. Berichte aus dem IFA, 2016-1

Hannover, Univ., Diss., 2015

ISBN: 978-395900-060-4

**Ohno 2013**

Ohno, Taiichi, 2013. *Das Toyota-Produktionssystem*. Unter Mitarbeit von Hof, Wilfried; Rother, Mike. 3., erweiterte und aktualisierte Auflage. Frankfurt, New York: Campus

ISBN: 978-359338-836-6

**OMG 2015**

OMG (2015). *OMG Unified Modeling Language (OMG UML): Version 2.5*. Hg. v. Object Management Group. Verfügbar unter:

<https://www.omg.org/spec/UML/2.5/PDF>

Zugriff am: 01.12.2022

**Ottmann et al. 2017**

Ottmann, Thomas; Widmayer, Peter, 2017. *Algorithmen und Datenstrukturen*. 6., durchgesehene Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg

ISBN: 978-3-662-55649-8

DOI: 10.1007/978-3-662-55650-4

**Patzak 1982**

Patzak, Gerold, 1982. *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-540-11783-4

DOI: 10.1007/978-3-642-81893-6

**Pfohl 2018**

Pfohl, Hans-Christian, 2018. *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg

ISBN: 978-3-662-56227-7

DOI: 10.1007/978-3-662-56228-4

**Piller et al. 2003**

Piller, Frank T.; Stotko, Christof M., 2003. *Mass Customization und Kundenintegration: Neue Wege zum innovativen Produkt*. Düsseldorf: Symposion

ISBN: 3-93660-805-9

**Piller 2006**

Piller, Frank T., 2006. *Mass customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.

ISBN: 978-3-8350-0355-2

**Pine 1993**

Pine, B. Joseph, 1993. *Mass customization: The new frontier in business competition*. Boston, Mass.: Harvard Business School Press  
ISBN: 0-87584-946-6

**Popper 1935**

Popper, Karl, 1935. *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der Modernen Naturwissenschaft*. Wien: Springer

**Powalla 2010**

Powalla, Christian, 2010. *Heuristiken im Rahmen der strategischen Analyse*  
Berlin, Freie Univ., Diss., 2010  
DOI: 10.17169/REFUBIUM-7902

**PYPL 2022**

PYPL (2022). *Die beliebtesten Programmiersprachen weltweit laut PYPL-Index im Mai 2022*. Hg. v. Statista. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/678732/>  
Zugriff am: 01.06.2022

**Rathnow 1993**

Rathnow, Peter J., 1993. *Integriertes Variantenmanagement: Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht. Innovative Unternehmensführung, 20  
ISBN: 3-525-12569-0

**Riedel et al. 1999**

Riedel, Hendrik; Eversheim, Walter; Korreck, Antje, 1999. Variantenorientierte Produktprogrammplanung : Komplexitätsbewältigung zwischen Markt und Produktion. In: Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung (Hrsg.): *Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagen?* Tagung Stuttgart, 12. und 13. Oktober 1999  
ISBN: 3-18-091510-2

**Riedl 2000**

Riedl, Rupert, 2000. *Strukturen der Komplexität*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-642-63111-5

DOI: 10.1007/978-3-642-56946-3

**Roessler et al. 2015**

Roessler, Markus Philipp; Kleeberg, Ina; Kreder, Moritz; Metternich, Joachim; Schuetzer, Klaus, 2015. Enhanced Value Stream Mapping: Potentials and Feasibility of IT Support through Manufacturing Execution Systems. In: Gen, Mitsuo; Kim, Kuinam J.; Huang, Xiaoxia; Hiroshi, Yabe (Hrsg.): *Industrial Engineering, Management Science and Applications 2015, Bd. 349*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 393–402

DOI: 10.1007/978-3-662-47200-2\_42

ISBN: 978-3-662-47199-9

**Ropohl 1979**

Ropohl, Günter, 1979. *Eine Systemtheorie der Technik: Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München, Wien: Carl Hanser

ISBN: 3-44612-801-8

**Ropohl 2009**

Ropohl, Günter, 2009. *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarbeitete Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag

ISBN: 978-3-86644-374-7

**Ropohl 2012**

Ropohl, Günter, 2012. *Allgemeine Systemtheorie: Einführung in transdisziplinäres Denken*. Berlin: edition sigma

ISBN: 978-3-8360-3586-6

**Roser et al. 2001**

Roser, Christoph; Nakano, Masaru; Tanaka, Minoru, 2001. A practical bottleneck detection method. In: Rohrer, Matt; Medeiros, Deb; Grabau, Mark (Hrsg.): *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. Arlington, VA, U.S.A., December 9 - 12, 2001, Bd. 2. Arlington, Va., S. 949–953  
ISBN: 978-0-7803-7309-9

**Rother et al. 2009**

Rother, Mike; Shook, John, 2009. *Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda*. Version 1.4. Cambridge, Mass.: Lean Enterprise Institute  
ISBN: 978-096678-430-5

**Schenk et al. 2014**

Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon, 2014. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-642-05458-7  
DOI: 10.1007/978-3-642-05459-4

**Schichtel 2002**

Schichtel, Markus, 2002. *Produktdatenmodellierung in der Praxis*. München: Hanser  
ISBN: 3-44621-857-2

**Schmidt 2011**

Schmidt, Matthias, 2011. *Modellierung logistischer Prozesse der Montage*. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. Berichte aus dem IFA, 2011-1  
Hannover, Univ., Diss., 2010  
ISBN: 978-394141-685-7

**Schmidt 2018**

Schmidt, Matthias, 2018. *Beeinflussung logistischer Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette durch die Produktionsplanung und -steuerung und das Produktionscontrolling*. Hannover  
Hannover, Univ., Habil., 2018

**Schmidt 2019**

Schmidt, Maurice, 2019. *Modellgestützte Bewertung der Kapazitätsabstimmung im Umfeld veränderlicher Nachfrage*. Garbsen: TEWISS. Berichte aus dem IFA, 2019-2  
Hannover, Universität, Diss., 2019  
ISBN: 978-3-95900-267-7

**Scholl 2008**

Scholl, Armin, 2008. Modellierung logistischer Systeme. In: Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Auflage, S. 35–94  
ISBN: 978-3-540-72928-0

**Schöllhammer et al. 2015**

Schöllhammer, Oliver; Jäger, Jens, 2015. *Studie Komplexitätsbewirtschaftung 2014*. Stuttgart  
urn:nbn:de:0011-n-4106529

**Schönsleben 2020**

Schönsleben, Paul, 2020. *Integrales Logistikmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-662-60672-8  
DOI: 10.1007/978-3-662-60673-5

**Schuh 1989**

Schuh, Günther, 1989. *Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten: Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten*. Düsseldorf: VDI Verlag. Berichte aus der Produktionstechnik, 177  
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1989  
ISBN: 3-18-147702-8

**Schuh et al. 2011**

Schuh, Günther; Behr, Marek; Brecher, Christian; Bührig-Polaczek, Andreas; Michaeli, Walter; Arnoscht, Jens et al., 2011. Individualisierte Produktion. In: Brecher, Christian (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 83–255  
DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1\_3  
ISBN: 978-3-642-20692-4

**Schuh et al. 2012a**

Schuh, Günther; Lenders, Michael; Nußbaum, Christopher; Rudolf, Stefan, 2012. Produktarchitekturgestaltung. In: Schuh, Günther (Hrsg.): *Innovationsmanagement*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 115–160  
DOI: 10.1007/978-3-642-25050-74  
ISBN: 978-3-642-25049-1

**Schuh et al. 2012b**

Schuh, Günther; Schmidt, Carsten; Helmig, Jan, 2012. Prozesse. In: Schuh, Günther; Stich, Volker (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 109–194  
ISBN: 978-3-642-25422-2

**Schuh et al. 2012c**

Schuh, Günther; Brandenburg, Ulrich; Cuber, Stefan, 2012. Aufgaben. In: Schuh, Günther; Stich, Volker (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 29–81  
ISBN: 978-3-642-25422-2



**Schuh et al. 2013**

Schuh, Günther; Krumm, Stephan; Amann, Wolfgang, 2013. *Chefsache Komplexität: Navigation für Führungskräfte*. Wiesbaden: Springer Gabler  
ISBN: 978-3-658-01613-5

**Schuh et al. 2017a**

Schuh, Günther; Riesener, Michael, 2017. *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*. Unter Mitarbeit von Breunig, Stefan; Dölle, Christian; Ebi, Manuel; Schiffer, Michael Gerrit; Schloesser, Sebastian; Schrey, Elisabeth. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser  
ISBN: 978-3-446-45334-0  
DOI: 10.3139/9783446453340

**Schuh et al. 2017b**

Schuh, Günther; Rudolf, Stefan; Riesener, Michael; Dölle, Christian; Schloesser, Sebastian, 2017. Product Production Complexity Research: Developments and Opportunities. *Procedia CIRP* **60**, S. 344–349  
DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.006

**Schwaninger 1994**

Schwaninger, Markus, 1994. *Managementsysteme*. Frankfurt am Main: Campus  
ISBN: 3-593-35068-8

**Seebacher 2013**

Seebacher, Gottfried, 2013. *Ansätze zur Beurteilung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität*. Berlin: Logos. Anwendungsorientierte Beiträge zum industriellen Management, 4  
Klagenfurt, Alpen-Adria Univ., Diss., 2013  
ISBN: 978-383253-535-3

**Seebacher et al. 2014**

Seebacher, Gottfried; Winkler, Herwig, 2014. Evaluating flexibility in discrete manufacturing based on performance and efficiency. *International Journal of Production Economics* **153**, S. 340–351

DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.03.018

**Shirose 1992**

Shirose, Kunio, 1992. *TPM for Workshop Leaders*. 1st. Portland: Taylor and Francis

ISBN: 0-91529-992-5

**Simon 1955**

Simon, Herbert A., 1955. A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics* **69** (1), S. 99–118

DOI: 10.2307/1884852

**Simon 1956**

Simon, Herbert A., 1956. Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review* **63** (2), S. 129–138

DOI: 10.1037/h0042769

**Simon 1962**

Simon, Herbert A., 1962. The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society* **106** (6), S. 467–482

**Slack et al. 2013**

Slack, Nigel; Brandon-Jones, Alistair; Johnston, Robert B., 2013. *Operations management*. 7. Edition. Harlow: Pearson

ISBN: 978-0-273-77620-8

**Specker 2005**

Specker, Adrian, 2005. *Modellierung von Informationssystemen*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich

ISBN: 978-3-7281-3713-5

**Spur et al. 1994**

Spur, Günther; Schröder, Sascha; Zurlino, Frank, 1994. Organisation. In: Spur, Günther; Stöferle, Theodor (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik*. Band 6 Fabrikbetrieb. München: Hanser, S. 198–227  
ISBN: 3-446-12537-X

**Stachowiak 1973**

Stachowiak, Herbert, 1973. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer  
ISBN: 3-211-81106-0

**Staud 2019**

Staud, Josef L., 2019. *Unternehmensmodellierung*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-662-59375-2  
DOI: 10.1007/978-3-662-59376-9

**Steinwasser 1996**

Steinwasser, Peter, 1996. *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung*. Bamberg: Meisenbach. Fertigungstechnik - Erlangen, 63  
Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996  
ISBN: 387-525-084-2

**Stüttgen 2003**

Stüttgen, Manfred, 2003. *Strategien der Komplexitätsbewältigung in Unternehmen: Ein transdisziplinärer Bezugsrahmen*. 2. Auflage. Bern, Wien: Haupt. St. Galler Beiträge zum integrierten Management, 12  
ISBN: 3-258-06702-3

**Taylor 1919**

Taylor, Frederick Winslow, 1919. *The principles of scientific management*. New York, London: Harper & Brothers Publishers

**Thommen et al. 2017**

Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Kaiser, Gernot, 2017. *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien  
ISBN: 978-3-658-07767-9  
DOI: 10.1007/978-3-658-07768-6

**Töllner et al. 2009**

Töllner, Alke; Jungmann, Thorsten; Bücken, Matthias; Brutscheck, Tobias, 2009. Modelle und Modellierung: Terminologie, Funktionen und Nutzung. In: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (Hrsg.): „*Das ist gar kein Modell!*“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler, S. 3–21  
ISBN: 978-3-8349-1842-0

**Tomašević et al. 2021**

Tomašević, Ivan; Stojanović, Dragana; Slović, Dragoslav; Simeunović, Barbara; Jovanović, Ivona, 2021. Lean in High-Mix/Low-Volume industry: a systematic literature review. *Production Planning & Control* **32** (12), S. 1004–1019  
DOI: 10.1080/09537287.2020.1782094

**Töpfer 2010**

Töpfer, Armin, 2010. *Erfolgreich Forschen: Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-642-13901-7

**Tufte 2001**

Tufte, Edward R., 2001. *The visual display of quantitative information*. 2. Edition. Cheshire, Conn.: Graphics Press  
ISBN: 978-096139-214-7

**Ulrich et al. 1976a**

Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). *WiSt Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* **5** (7), S. 304–309

**Ulrich et al. 1976b**

Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). *WiSt Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* **5** (8), S. 345–350

**Ulrich 1995**

Ulrich, Karl, 1995. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy* **24** (3), S. 419–440  
DOI: 10.1016/0048-7333(94)00775-3

**Ulrich et al. 1995**

Ulrich, Hans; Probst, Gilbert J. B., 1995. *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte*. 4., unveränderte Auflage. Bern: Haupt  
ISBN: 978-325805-182-6

**Ulrich et al. 2001**

Ulrich, Hans; Schwaninger, Markus (Hrsg.), 2001. *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*. Studienausgabe. Bern: Haupt  
ISBN: 3-258-06359-1

**Unbehauen et al. 2014**

Unbehauen, Heinz; Ley, Frank, 2014. *Das Ingenieurwissen: Regelungs- und Steuerungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer  
ISBN: 978-3-662-44025-4  
DOI: 10.1007/978-3-662-44026-1

**Ungern-Sternberg et al. 2020a**

Ungern-Sternberg, Roman; Fries, Christian; Wiendahl, Hans-Hermann, 2020. Backlog Oriented Bottleneck Management – Practical Guide for Production Managers. In: Lalic, Bojan; Majstorovic, Vidosav; Marjanovic, Ugljesa; Cieminski, Gregor von; Romero, David (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing, Bd. 592*. Cham: Springer (592), S. 581–589

DOI: 10.1007/978-3-030-57997-5\_67

ISBN: 978-3-030-57996-8

**Ungern-Sternberg et al. 2020b**

Ungern-Sternberg, Roman; Erlach, Klaus, 2020. Konfiguration der Variantenflexibilität. *Werkstattstechnik online* **110** (4), S. 245–249

**Ungern-Sternberg et al. 2021**

Ungern-Sternberg, Roman; Leipoldt, Christoph; Erlach, Klaus, 2021. Work Center Performance Measurement Based On Multiple Time Series. *Procedia CIRP* **104**, S. 276–282

DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.047

**Unwin 2008**

Unwin, Antony, 2008. Good Graphics? In: Chen, Chun-houh; Härdle, Wolfgang; Unwin, Antony (Hrsg.): *Handbook of Data Visualization*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 57–78

ISBN: 978-3-540-33036-3

**Upton 1995**

Upton, David M., 1995. Flexibility as process mobility: The management of plant capabilities for quick response manufacturing. *Journal of Operations Management* **12** (3-4), S. 205–224

DOI: 10.1016/0272-6963(95)00004-C

**VDI 4400 Blatt 2**

VDI 4400 Blatt 2:2004. *VDI 4400-2 Logistikkennzahlen für die Produktion*

**VDI 5200 Blatt 1**

VDI 5200 Blatt 1:2011. *Fabrikplanung Planungsvorgehen*

**VDI 2870 Blatt 1**

VDI 2870 Blatt 1:2012. *Ganzheitliche Produktionssysteme Grundlagen, Einführung und Bewertung*

**VDI 2870 Blatt 2**

VDI 2870 Blatt 2:2013. *Ganzheitliche Produktionssysteme Methodenkatalog*

**Vester 2000**

Vester, Frederic, 2000. *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität*. 3., durchgesehene Auflage. Stuttgart:

DVA

ISBN: 3-42105-308-1

**Vogel et al. 2016**

Vogel, Wolfgang; Lasch, Rainer, 2016. Complexity drivers in manufacturing companies: A literature review. *Logistics Research* **9** (1)

DOI: 10.1007/s12159-016-0152-9

**Vollmann et al. 2005**

Vollmann, Thomas E.; Berry, William L.; Whybark, Clay D.; Jacobs, F. Robert, 2005. *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. 5. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin

ISBN: 007-112133-1

**Wahlers 1998**

Wahlers, Thomas, 1998. *Modellgestützte Analyse und Verbesserung der logistischen Merkmale komplexer Serienprodukte*. Düsseldorf: VDI Verlag. Fortschritt-

Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, 475

Hannover, Univ., Diss., 1998

ISBN: 3-183-47502-2

**Warnecke 1992**

Warnecke, Hans-Jürgen, 1992. *Die Fraktale Fabrik: Revolution der Unternehmenskultur*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-662-06648-5

DOI: 10.1007/978-3-662-06647-8

**Westkämper et al. 1999**

Westkämper, Engelbert; Wiendahl, Hans-Hermann; März, Lothar, 1999. Fabrikplanung und Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen: Ergänzung oder Konkurrenz? *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **94** (10), 610-613

**Westkämper et al. 2000a**

Westkämper, Engelbert; Wiendahl, Hans-Hermann; Pritschow, Günter; Rempp, Burkhard; Schanz, Michael, 2000. Turbulenz in der PPS - eine Analogie. *Werkstattstechnik online* **90** (5), S. 203–207

**Westkämper et al. 2000b**

Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich; Balve, Patrick; Tilebein, Meike, 2000. Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *Werkstattstechnik online* **90** (1/2), S. 22–26

**Westkämper 2014**

Westkämper, Engelbert, 2014. Fertigungs- und Fabrikbetrieb. In: Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg; Dubbel, Heinrich (Hrsg.): *Dubbel*. Taschenbuch für den Maschinenbau. 24., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, S. S124-S145

ISBN: 978-3-642-38890-3

**Wiendahl 1987**

Wiendahl, Hans-Peter, 1987. *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung: Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung*. München: Hanser

ISBN: 3-446-14592-3



**Wiendahl et al. 1994**

Wiendahl, Hans-Peter; Scholtissek, P., 1994. Management and Control of Complexity in Manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **43** (2), S. 533–540

DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60499-5

**Wiendahl 1997**

Wiendahl, Hans-Peter, 1997. *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. 2. Auflage. München: Hanser  
ISBN: 3-44619-084-8

**Wiendahl et al. 1998**

Wiendahl, Hans-Peter; Nyhuis, Peter, 1998. *Engpaßorientierte Logistikanalyse: Methoden zur kurzfristigen Leistungssteigerung in Produktionsprozessen*. München: TCW

ISBN: 3-93151-156-1

**Wiendahl 2002**

Wiendahl, Hans-Hermann, 2002. *Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und Praxis, 358

Stuttgart, Univ., Diss., 2002

ISBN: 3-93138-887-5

**Wiendahl et al. 2004**

Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (Hrsg.), 2004. *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-642-62372-1

**Wiendahl et al. 2007**

Wiendahl, Hans-Peter; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, Hans-Hermann; Duffie, N.; Brieke, M., 2007. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals* **56** (2), S. 783–809

DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003

**Wiendahl 2008**

Wiendahl, Hans-Hermann, 2008. Stolpersteine der Lieferterminermittlung und -erfüllung. In: Schuh, Günther (Hrsg.): *Effiziente Auftragsabwicklung mit myOpenFactory*. München, Wien: Hanser, S. 31–54

ISBN: 978-3-446-41278-1

**Wiendahl 2011**

Wiendahl, Hans-Hermann, 2011. *Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 3-642-19148-7

**Wiendahl et al. 2012**

Wiendahl, Hans-Peter; Nyhuis, Peter; Bertsch, Sebastian; Grigutsch, Michael, 2012. Controlling in Lieferketten. In: Schuh, Günther; Stich, Volker (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 11–59

ISBN: 978-3-642-25426-0

**Wiendahl et al. 2014**

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter, 2014. *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser

ISBN: 978-3-446-43892-7

**Wiendahl 2014**

Wiendahl, Hans-Peter, 2014. *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 8., überarbeitete Auflage. München: Hanser

ISBN: 978-3-446-44053-1

**Wiendahl et al. 2015**

Wiendahl, Hans-Hermann; Steinberg, Fabian, 2015. Montageversorgungsanalyse in der Einzelfertigung: Ist-Situation, Potentiale und Ursachen. *Werkstattstechnik online* **105** (9), S. 597–603

**Wiendahl 2017**

Wiendahl, Hans-Hermann, 2017. Das PPS-Fachkonzept für eine erfolgreiche und nachhaltige PPS. In: Bauernhansl, Thomas (Hrsg.): *18. Stuttgarter PPS-Tag*. Stuttgart, 26.09.2017. Fraunhofer IPA, S. 1–33

**Wiendahl et al. 2019**

Wiendahl, Hans-Hermann; Kluth, Andreas, 2019. Verbesserungstreiber und MES-Funktionsschwerpunkte: MES-Werkzeuge als Enabler für Digitalisierung? *Industrie 4.0 Lösungen* (2), S. 24–27

**Wiendahl et al. 2020**

Wiendahl, Hans-Peter; Wiendahl, Hans-Hermann, 2020. *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser ISBN: 978-344644-661-8

**Wildemann 1994**

Wildemann, Horst, 1994. *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung*. 4., neubearbeitete Auflage. München: TCW ISBN: 3-92991-830-7

**Wildemann 2013**

Wildemann, Horst, 2013. *Variantenmanagement: Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess*. 21. Auflage. München: TCW ISBN: 978-3-929918-17-5

**Wildemann 2014**

Wildemann, Horst, 2014. *Komplexitätsmanagement: In Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion*. 15. Auflage. München: TCW ISBN: 978-3-931511-30-2

**Wildemann 2018**

Wildemann, Horst, 2018. *Komplexitätsmanagement: In Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion*. 19. Auflage. München: TCW  
ISBN: 978-3-931511-30-2

**Winkler et al. 2017**

Winkler, Herwig; Lugert, Andreas, 2017. *Die Wertstrommethode im Zeitalter von Industrie 4.0 - Studienreport*. Cottbus: BTU Cottbus - Senftenberg  
ISBN: 978-3-940471-29-1

**Wochinger et al. 2013**

Wochinger, Thomas; Schatz, Anja, 2013. Der steigenden Komplexität mit Wandlungsfähigkeit begegnen. *Industrie Management* **29** (6), S. 61–64

**Womack et al. 1990**

Womack, James P.; Jones, Daniel T.; Roos, Daniel, 1990. *The machine that changed the world: Based on the Massachusetts Institute of Technology 5 million dollar 5 year study on the future of the automobile*. New York, NY: Rawson  
ISBN: 0-89256-350-8

**Yu 2001**

Yu, Kwok-Wai, 2001. *Terminkennlinie: Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich*. Düsseldorf: VDI Verlag. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, 576  
Hannover, Univ., Diss., 2001  
ISBN: 3-18357-602-3

**Zäh et al. 2005**

Zäh, Michael F.; Möller, Niklas.; Vogl, Wolfgang, 2005. Symbiosis of Changeable and Virtual Production: The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Reinhart, Gunther; Zäh, Michael (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. München: Utz  
ISBN: 978-3-8316-0540-8

# A Anhang

## **A.1 Relevante Ansätze der Systemgestaltung**

Der Anhang gibt einen Überblick über relevante Ansätze zur Systemgestaltung. Sie bilden die Grundlage zur Synthese der günstigen Systemeigenschaften.

Der erste Abschnitt stellt grundlegende systemtheoretische Ansätze vor. Darauf folgt die Darstellung von struktur- und verhaltensorientierten Ansätzen mit Bezug zur wertstromorientierten Variantenfertigung.

### ***Systemtheoretische Gestaltungsansätze***

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien lassen sich anhand des zugrundeliegenden Paradigmas unterscheiden, vgl. Abs. 2.3.1. Nachfolgend werden Prinzipien der komplexitätsorientierten und der klassischen Systemgestaltung sowie strategische Optionen zur Handhabung der Komplexität dargestellt.

### **Systemtheoretische Ansätze, basierend auf dem komplexitätsorientierten Paradigma**

**Gestaltungsprinzipien für Systeme „Out of Control“:** Kelly fasst seine Untersuchung „Out of Control“ zu komplexen adaptiven Systemen in neun Gestaltungsprinzipien (für komplexe adaptive) Systeme zusammen. Die Arbeit wurde in der Managementforschung und Unternehmenspraxis positiv bewertet. (Kelly 1997, S. 595; Stüttgen 2003, S. 48–49). Dabei konzentrieren sich die Richtlinien der Intelligenzverteilung, der Bottom-up-Lenkung sowie des Wachstums über funktionierende Einheiten auf die Beschreibung des Systemzustands. Die Richtlinien Diversität und Fehlerfreundlichkeit beschreiben die Evolution des Systems. Die Richtlinien des stabilen Ungleichgewichts, der zunehmenden Grenzerträge sowie der Wandlung des Wandels beschreiben, wie Systemzustand und Evolution im Einklang stehen. Die letzte Richtlinie beschreibt die Balance vieler Ziele eines komplexen adaptiven Systems. (Stüttgen 2003, 51, 250–251)

**Prinzipien der Biokybernetik:** Vester entwickelt im Rahmen einer UNESCO-Studie acht Grundregeln der Systemgestaltung, angelehnt an die Biokybernetik. Diese stehen grundsätzlich im Einklang mit den Prinzipien Kellys. Insbesondere im Bereich Energienutzung,

Kreislaufwirtschaft und (biologischer) Symbiose detaillieren sie Kellys Arbeit. (Vester 2000, S. 124–142).

**Schlüsselkonzepte der Evolution:** Bar-Yam entwickelt neun Schlüsselkonzepte, die ein Umwelt schaffen sollen, um Evolution und somit das Entstehen komplexer Systeme zu begünstigen. Schwerpunkt des Complex Systems Engineering ist die Schaffung der Voraussetzungen für die Systementstehung und nicht die Gestaltung des Systems selbst. (Bar-Yam 2006, S. 33).

**Nutzung der Komplexität:** Axelrod und Cohen beschreiben acht, anhand von Beispielen abgeleitete, Maßnahmen, um Komplexität zu nutzen („to harness complexity“). (Axelrod et al. 2000, S. xi–xii, 155–158)

**Lenkung und Gestaltung komplexer Systeme:** Malik entwickelt, aufbauend auf dem St. Galler Managementverständnis, eine an die Praxis gerichtete Managementlehre komplexer sozio-technischer Systeme. (Malik 1996, S. VII–XVII). Dabei werden 24 heuristische Grundsätze sowie 21 strategische Verhaltensweisen aufgezeigt, die bei der Lenkung und Gestaltung komplexer Systeme eingesetzt werden sollen. (Malik 1996, Abs. 3.5, S. 425–452). Aufgrund der Ausrichtung an Fragestellungen des Managements tritt der produktionstechnische Aspekt dabei in den Hintergrund.

### **Systemtheoretische Ansätze basierend auf dem klassischen Paradigma**

**Systems Engineering:** Haberfellner et al. verwenden neben den vier Grundgedanken des Systems Engineerings weitere Gestaltungsprinzipien und -richtlinien. Im Rahmen des Systemdenkens sind die Prinzipien Idealität, Unabhängigkeit, Modularer Aufbau, Pieceal Engineering und Minimale Präjudizierung genannt (Haberfellner et al. 2015, 135–137, 238). Gestaltungsmerkmale für Architekturen sind Integrierbarkeit, Skalierbarkeit und Dezentralisierung. (Haberfellner et al. 2015, S. 187–188), vgl. (Crawley et al. 2016)

**Prinzipien guter Systemgestaltung:** Bahill und Botta beschreiben 34 weitere Prinzipien guter Systemgestaltung, die sich mit denen des Systems Engineering sowie teils mit den komplexitätsorientierten Ansätzen decken (Bahill et al. 2008).

**Wandlungsfähige Systeme:** Fricke und Schulz berücksichtigen die vier Aspekte Robustheit, Flexibilität, Agilität und Adaptivität, um ein wandlungsfähiges System zu gestalten. (Fricke et al. 2005, S. 356)

### **Strategische Optionen im Rahmen der Systemgestaltung**

**Handlungsstrategien:** Jäger et al. stellen fünf Handlungsstrategien für den Umgang mit Komplexität in Wertschöpfungsnetzen vor: Effizientes Handhaben notwendiger Komplexität, Reduzieren unprofitabler Komplexität, Vorausschauendes Vermeiden von Komplexität, Bepreisen von Komplexitätsursachen und das Erzeugen von notwendiger interner Komplexität. (Jäger et al. 2014, S. 649), vgl. (Bauernhansl et al. 2014).

**Umgang mit Turbulenz:** Ähnlich sind die Überlegungen von H.-H. Wiendahl zum Umgang mit Turbulenz. Basierend auf den grundsätzlichen Alternativen Vermeiden und Beherrschen, werden die fünf Strategien Beseitigen, Reduzieren, Reagieren, Planen und Dämpfen formuliert. (Wiendahl 2011, S. 413)

**Umgang mit Varianz:** Große-Heitmeyer und H.-P. Wiendahl unterteilen Maßnahmen zum Umgang mit Varianz grundsätzlich in die vier Arten Verhindern, Verringern, Verlagern und Beherrschen (Große-Heitmeyer et al. 2004a, S. 12).

**Ausgestaltung des Komplexitätsmanagements:** (Wildemann 2014) skizziert drei Strategien (Reduktion, Beherrschung und Vermeidung) sowie vier Leitlinien (Individualisierung, Standardisierung, Transparenz und Konzentration auf das Kerngeschäft) für ein durchgängiges Komplexitätsmanagement. (Wildemann 2014, S. 45)

### **Strukturorientierte Gestaltungsansätze**

Die Gestaltungsansätze werden nach Schwerpunkt in Produkt- oder Produktionsorientierte Ansätze gegliedert. Schwerpunkt der produktorientierten Ansätze sind Richtlinien zur Produktgestaltung mit Wirkung auf die logistischen Ziele, wobei zwischen angebotenerem Produktprogramm und der Produktarchitektur unterschieden werden kann.

### **Strukturorientierte Ansätze mit dem Produktprogrammschwerpunkt**

**Mass Customization:** Das von Pine entwickelte Mass Customization, auch als kundenindividuelle Massenproduktion bekannte, ganzheitliche, wettbewerbsstrategische Konzept zielt darauf ab, kundenindividuelle Produkte zu Kosten (nahe) der Massenproduktion

herzustellen. Dabei werden bestehende Konzepte der Variantenfertigung um kundenintegrierte Wertschöpfung erweitert. (Piller et al. 2003, S. 21–22), vgl. (Davis 1987), (Pine 1993), (Piller 2006). Zentral aus Produktionssicht ist dabei die vorausschauende Gestaltung der Produkte und Prozesse bezüglich ihrer Individualisierbarkeit. Grundmuster dafür ist die Modularisierung. (Piller et al. 2003, S. 96, 100)

**Erfolgsfaktoren des Variantenmanagements:** Schuh und Riesener identifizieren sieben zentrale Erfolgsfaktoren des Komplexitäts- und Variantenmanagements. Diese beinhalten ein klares Bekenntnis des Managements sowie eine klare Definition der Kunden und des Leistungsangebots. Steigende Vielfalt wird strategisch geplant und anhand transparenter Kosten bepreist. Diese Schaffung eines Bewusstseins für das Variantenmanagement vermeidet Komplexität. Über eine aufbauorganisatorische Verankerung wird eine nachhaltige Wirkung sichergestellt. (Schuh et al. 2017a, S. 39–42) Ein zentrales Element des Variantenmanagements ist die Gestaltung des angebotenen Produktprogramms. Die Steuerung des Produktprogramms lässt sich in die vier grundsätzlichen Szenarien kundenspezifisches Engineering, Release-Engineering, Variantenpflege und Grundtypen-Engineering untergliedern. Dabei stiftet insbesondere das Release-Engineering (mit sich wandelndem und dabei in der Breite unverändertem Leistungsprogramm), kombiniert mit konsequenter Produktmodularisierung, einen hohen internen sowie externen Nutzen. (Schuh et al. 2017a, S. 85–86)

### **Strukturorientierte Ansätze mit dem Produktarchitekturschwerpunkt**

**Konstruktionslehre:** Der Herausgeberband Pahl/Beitz Konstruktionslehre beschreibt, ausgehend von den drei Grundregeln der Gestaltung (eindeutig, einfach, sicher), fünf Gestaltungsprinzipien sowie eine Auswahl wichtiger Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion einzelner Produkte. (Feldhusen et al. 2013, Kap. 11–13).

**Modulare Baukastensysteme:** Schuh und Riesener nennen zehn umfassende Erfolgsfaktoren mit dem Schwerpunkt Gestaltung modularer Baukastensysteme. (Schuh et al. 2017a, S. 228), vgl. auch (Ulrich 1995).



**Gestaltung von Variantenprodukten:** Kipp und Krause entwickeln 16 Design Guidelines für Variantenprodukte in den Bereichen Produktgestaltung, -architektur und -variantenerzeugung. (Kipp et al. 2008, S. 428–431)

**Reduzierung der Produktkomplexität:** Mühlenbruch beschreibt fünf Gestaltungsrichtlinien zur Reduzierung der Produktkomplexität, die in zehn Bereiche gegliedert werden (Mühlenbruch 2004, S. 46–48).

### **Strukturorientierte Ansätze mit Produktionsschwerpunkt**

**Ganzheitliche Produktionssysteme:** Ganzheitliche Produktionssysteme werden in vielen Unternehmen verwendet, um ein stimmiges Gesamtsystem aus Methoden und Werkzeugen zu entwickeln. Dabei gelten die Gestaltungsprinzipien: Standardisierung, Null-Fehler-Prinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, kontinuierlicher Verbesserungsprozess, Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung, Vermeidung von Verschwendung und visuelles Management (VDI 2870 Blatt 1, S. 13). Die darauf aufbauenden geeigneten Methoden können unter anderem anhand ihres Beitrags zu den Zieldimensionen Qualität, Kosten und Zeit ausgewählt werden (VDI 2870 Blatt 2, S. 4–5, vgl. Dombrowski et al. 2015, Kap. 2; Erlach 2020, S. 323–327; Kötter et al. 2016).

**Wertstromdesign:** Das Wertstromdesign nach Erlach bietet eine umfassende Hilfestellung bei der Gestaltung einer Produktion. Aufbauend auf der Grundidee der Vermeidung von Verschwendung werden die Bereiche Produktionsstruktur, -prozesse, -steuerung und -planung mit Hilfe von zehn Gestaltungsrichtlinien (um)gestaltet. (Erlach 2020, S. 262–263; Schönsleben 2020, S. 289)

**Fertigungssegmentierung:** Wildemann beschreibt ein ähnliches Vorgehen zur Segmentierung anhand von fünf Definitionsmerkmalen eines Fertigungssegments. Es werden acht Gestaltungsprinzipien zur Planung von Fertigungssegmenten entwickelt. (Wildemann 1994, S. 47–54, 270–282)

**Fraktale Fabrik:** Warnecke entwirft bereits 1992 das Konzept der Fraktalen Fabrik mit den Eigenschaften Selbstähnlichkeit, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, Zielorientierung und Dynamik (Warnecke 1992, S. 143). Das Konzept ist produktionszentriert und

steht dabei in Einklang mit den Gestaltungsprinzipien von Kelly (1997) für ein komplexes System. (vgl. Bauernhansl 2017, S. 11)

**Flexible Produktionsendstufe:** Das von H.-P. Wiendahl et al. entwickelte Konzept der flexiblen Produktionsendstufe zielt darauf ab, die Produktionsprozesse zeitlich anhand des Variantenentstehungspunktes in variantenneutrale und variantenbestimmende Prozesse und nicht nach der klassischen Struktur in Teilefertigung und Montage zu ordnen. Ziel ist eine hohe Volumen- und Variantenflexibilität bei kurzen Lieferzeiten. (Wiendahl et al. 2004, S. VII; Große-Heitmeyer et al. 2004a, S. 13). Grundlage des Konzepts der flexiblen Produktionsendstufe ist eine segmentierte, auf den Markt ausgerichtete Produktion. (Große-Heitmeyer et al. 2004b, S. 33)

### ***Verhaltensorientierte Gestaltungsansätze***

Ziel der Ansätze mit Produktschwerpunkt ist die geeignete Konfiguration der System-schnittstelle zwischen Kunde und Produktion. Ansätze mit Produktionsschwerpunkt hingegen zielen auf eine geeignete interne Systemgestaltung ab.

### **Verhaltensorientierte Ansätze mit Produktschwerpunkt**

**Angebotene Logistikleistung:** Neben der Vielfalt des Leistungsangebots spielt auch die damit verbundene angebotene externe Logistikleistung, die sich in Lieferzeit, Liefertreue und Servicegrad gliedert, eine zentrale Rolle, vgl. (Lödding 2016, S. 21), Abs. 3.3.1. Die Logistikleistung sollte aus der Unternehmensstrategie abgeleitet werden. Dabei lassen sich vier Ausprägungen anhand der internen oder externen Orientierung der Logistik sowie der neutralen oder wesentlichen Rolle der Logistik unterscheiden (Wiendahl 2011, S. 266–267; Nyhuis et al. 2008, S. 297). Kurze Lieferzeiten bieten für das liefernde Unternehmen Potenziale für überdurchschnittliches Wachstum und Renditen. Sie bieten dem nachfragenden Unternehmen einen ökonomischen Nutzen, weshalb sich für die Leistung oft höhere Preise durchsetzen lassen (Lödding 2016, S. 22–26).

**Strategische Disposition:** Zur Erreichung der logistischen Ziele bei gegebener Komplexität dient das Konzept der strategischen Disposition. Dabei werden zunächst kundenauftragsneutrale Pläne erstellt, die bei Eintreffen der Kundenaufträge in konkrete Aufträge

umgewandelt werden. Kombiniert mit einem geeignet gewählten Kundenentkopplungspunkt sollen so die internen Abläufe beruhigt und kurze Lieferzeiten erzielt werden. (Schuh et al. 2017a, S. 194–196, Köster 1998, S. 136–137)

**Wahl des Kundenentkopplungspunktes:** Ein zentrales Gestaltungsmerkmal zur Beeinflussung der externen logistischen Leistung ist die Bestimmung des Kundenentkopplungspunktes. Die Position des Punktes innerhalb der logistischen Kette beeinflusst die Lieferzeiten (DLZ aus Kundensicht) und die Lagerbestandshöhen maßgeblich. (Nyhuis et al. 2012, S. 4; Schönsleben 2020, S. 43–44; Lödding 2016, S. 23)

### **Verhaltensorientierte Ansätze mit Produktionsschwerpunkt**

**Konfiguration des Auftragsmanagements:** H.-H. Wiendahl (2011, Abs. 6.3) entwickelt ausgehend von der zuvor bestimmten Logistikstrategie ein logistisches Fachkonzept für das Auftragsmanagement anhand von sieben Gestaltungsmerkmalen. Die Merkmale werden hinsichtlich der Einflusskriterien für die Ausgestaltung sowie der logistischen Bedeutung beschrieben.

**Gestaltung der Fertigungssteuerung:** Basierend auf den internen logistischen Zielgrößen und in Anlehnung an die Grundgesetze der Produktionslogistik entwickelt Lödding neun Leitsätze für die Gestaltung von Fertigungssteuerungsverfahren. (Lödding 2016, S. 102–104, vgl. Nyhuis et al. 2012, Kap. 5). Erlach (2020, S. 171–262) verwendet innerhalb des Wertstromdesign ähnliche Ansätze, fokussiert jedoch auf laminare Auftragsströme.

**Total Productive Maintenance (TPM):** Eine hohe und stabile Verfügbarkeit der Arbeitssysteme ist Ziel der Ansätze des TPM. Shirose (1992) beschreibt sechs Effekte niedriger Ressourceneffizienz (darunter auch Rüstzeitverluste), Nakajima beschreibt ein zwölfstufiges Vorgehen zur Einführung von TPM. (vgl. Nakajima 1988; Koch 2008; Focke et al. 2018).

**Total Quality Management (TQM):** Hohe Produktqualität durch stabile Prozesse ist strategisches Ziel im TQM. Ausgehend von statistischer Qualitätskontrolle hat sich mit dem TQM ein auf zahlreichen Vorarbeiten basierendes, umfassendes Konzept des Qualitätsmanagements entwickelt. (Brüggemann et al. 2020, S. 5–7) Crosby beschreibt das Null-

Fehler-Programm mit vier Eckpfeilern (Crosby 1980, S. 6–7). Deming (2000, Kap. 2) entwickelt ein Qualitätsmanagement mit 14 Management-Prinzipien. Zudem entwickelt er, basierend auf den Vorarbeiten von Shewart, den Plan-Do-Check-Act (PDCA) Zyklus (vgl. Wiendahl 2011, S. 72).

## A.2 Anforderungskatalog an eine Methode zur Komplexitätsbewältigung

Grossmann entwickelt einen Fragenkatalog zur Prüfung von Methoden im Bereich Komplexitätsmanagement. (Grossmann 1992, S. 298)

Die Bewertung der entwickelten Methode erfolgt anhand der 44 Fragen. Der Erfüllungsgrad wird folgendermaßen bewertet:

- Die entwickelte Methode erfüllt die Anforderungen vollständig (1 Punkt)
- Die Methode erfüllt die Anforderungen teilweise (½ Punkt)
- Die Methode erfüllt die Anforderungen nicht (0 Punkte)

### Prüffrage

### Erfüllungsgrad

#### Dimensionale Anforderungen (3/3)

- |   |  |
|---|--|
| 1. Ist die sachbezogene Dimension ausreichend, wiederholt und in hohem Mass berücksichtigt?       | Die sachbezogene Dimension, hier als strukturbezogene Dimension bezeichnet, in den Bereichen Produkt und Produktion berücksichtigt. (1)                                |
| 2. Ist die verhaltensbezogene Dimension ausreichend, wiederholt und in hohem Mass berücksichtigt? | Die verhaltensbezogene Dimension wird in den Bereichen Produkt und Produktion unter Verwendung der logistischen Kennzahlen und der Trichtertheorie berücksichtigt. (1) |
| 3. Sind beide Managementdimensionen ausgeglichen berücksichtigt?                                  | Produktnetz und Wertstrom stellen die beiden Dimensionen jeweils gleichzeitig dar, um die Dualität aus Struktur und Verhalten zu betonen. (1)                          |

### Theoretische Anforderungen (16,5/17)

---

- |   |   |
|---|---|
| 4. Kann eine hohe Anzahl von Elementen des betrachteten Gesamtsystems berücksichtigt werden?                    | Die Bildung von Produktionssegmenten und -modulen ermöglicht die aggregierte Betrachtung einer hohen Anzahl an Elementen. (1)   |
| 5. Können die gegenseitigen Beziehungen zwischen den Elementen ausreichend berücksichtigt werden?               | Im Produktnetz zeigen die Komplettierungsmuster die Beziehungen der Artikel zueinander. Die Beziehungen der Arbeitssysteme zueinander ist im Wertstrom dargestellt. (1)   |
| 6. Wie werden die sich im System feststellbaren Veränderungen über die Zeit erfasst?                            | Die Erfassung aller Kennzahlen erfolgt über Zeitreihen. Durch Zeitreihen können theoretisch alle Systemzustände abgebildet werden. (1)  |
| 7. Können sich ändernde Wirkungsverläufe erfasst werden?  | Sofern die Zustände in Zeitreihen erfasst wurden, können die Zustände mit Hilfe der Kennzahlenanalyse untersucht werden. (1)  |
| 8. Wie können in einer gegebenen Zeitspanne verschiedene Zustände des betrachteten Systems festgehalten werden? | Die Aufnahme der Zustände erfolgt in Zeitreihen. Primär werden dabei Kennzahlen zur Beschreibung des Verhaltens aufgenommen (vgl. Nr. 6). Eine explizite Aufnahme struktureller Veränderungen in der eher strukturfixierten wertstromorientierten Variantenfertigung erfolgt nicht. (½) |
| 9. Ist das abgebildete System ein offenes System?   | Das abgebildete Produkt-Produktionssystem ist ein offenes System. (1)   |
| 10. Ist es möglich, insgesamt eine präzise Themenabgrenzung vorzunehmen?  | Über die Ursache-Wirkungs-Diagramme lassen sich die Wirkungen einzelner Faktoren bestimmen und zielgerichtet untersuchen. (1)   |

11. Wird beachtet, dass ein komplexes System analytisch unbestimmbar ist? Die Methode ist durch ihren hierarchischen top-down Ansatz auf die Arbeit mit unvollständigen Informationen ausgelegt. (1)
12. Auf welche Weise wird die Abhängigkeit des Systems von der Vergangenheit deutlich gemacht? Über die Zeitreihenanalyse lassen sich vergangene Zustände zu aktuellen Zuständen in Beziehung setzen. (1)
13. Werden interne und externe Rückkopplungen berücksichtigt? Die Analyse erfolgt aus externer Kundensicht und interner Dispositionssicht. Über die Fehlerkreise werden pathologische Rückkopplungen berücksichtigt. (1)
14. Wird beachtet, dass komplexe Systeme nicht beherrscht werden können? Die heuristische Analyse basiert auf der Annahme, dass das System nicht vollständig beschreibbar und beherrschbar ist. (1)
15. Besteht kein Widerspruch zum Ansatz der Varietät als Maß der Komplexität? Das Modell berücksichtigt Dynamik und Flexibilität als Einflussfaktoren auf das erwünschte Systemverhalten. Es besteht kein Widerspruch. (1)
16. Wird die Komplexität akzeptiert und ein reduktionistisches Vorgehen verhindert? Das Vorgehen stellt systematisch die Zusammenhänge zwischen Struktur und Verhalten dar. Die verwendeten Ursache-Wirkungs-Diagramme zeigen bewusst eine Vielzahl an möglichen Einflussgrößen und berücksichtigen grundsätzlich unternehmensspezifische Faktoren. (1)
17. Wird Varietätserhöhung und -verminderung ("variety engineering") unterstützt? Die Analyse stellt über die Zeitreihenanalyse die Dynamik der Nachfrage als auch über die Engpassanalysen die Flexibilität des Systems dar. Dies ermöglicht

- dem Anwender eine differenzierte, eigenständige Bewertung. (1)
18. Wird die Systemumwelt in die Betrachtung einbezogen und ihre Varietät untersucht? Die Analyse der Liefertreue und der Lieferzeit erfolgt ausdrücklich aus externer Kundensicht. (1)
19. Wird eine effiziente und effektive Informationsverarbeitung gefördert? Das top-down ausgerichtete Vorgehen nutzt bestehendes Anwenderwissen und kombiniert dieses mit Datenanalysen. (1)
20. Verfügen die Informationskanäle und -wandler über ausreichende Kapazitäten? Die entwickelten Visualisierungen sind auf die Verarbeitbarkeit durch menschliche Anwender ausgerichtet. Sie knüpfen an bestehende Visualisierungen an. (1)

### **Deskriptive Anforderungen (1,5/2)**

---

21. Können die quantitativen Aspekte des Gesamtsystems, also Unternehmen und Umwelt, erfasst werden? Die quantitativen Aspekte werden über Kennzahlen erfasst. (1)
22. Können die qualitativen Aspekte des Gesamtsystems, also Unternehmen und Umwelt, erfasst werden? Qualitative Aspekte können im Rahmen des Analysevorgehens erfasst werden. Eine systematische Prüfung ist nicht Teil des quantitativen Analysemodells. (1/2)
-



**Praktische Anforderungen (6,5/7)**

---

23. Führt das geplante Vorgehen zu konkreten Ergebnissen? Über die Ursache-Wirkungs-Diagramme werden Ursachen detailliert aufgeführt. Die Ursachenkonsolidierung unterstützt bei der weiteren Konkretisierung der Ergebnisse. (1)
24. Ist das geplante Vorgehen verständlich? Das Vorgehen erweitert ein bekanntes Grundmodell. Die Analyse ist an bestehende, in Theorie und Praxis angewandte, logistische Zieldimensionen angelehnt. (1)
25. Erhöht das geplante Vorgehen die Dynamik des Systems? Die Analysemethode kann die Dynamik des Systems beschreiben. Eine Erhöhung der Dynamik kann durch gezielte Eingriffe. Die günstigen Systemeigenschaften berücksichtigen die Notwendigkeit der Systemdynamik. (½)
26. Wird mit dem geplanten Vorgehen die Kreativität der Beteiligten angeregt? Günstige Systemeigenschaften beschreiben das System abstrakt. Zur Übertragung der Eigenschaften auf das aktuell untersuchte System ist Kreativität notwendig. (1)
27. Fördert das geplante Vorgehen die humansozialen Aspekte der Problemlösung? Die Darstellungen machen die Systemzusammenhänge intuitiv begreifbar. Das fördert die Zusammenarbeit von Menschen mit unterschiedlichen Erfahrungshintergründen. (1)
28. Fördert das geplante Vorgehen den offenen Umgang der Beteiligten miteinander sowie eine geistige Offenheit? Die Visualisierung stellt die objektiven Zusammenhänge in neutraler Form dar und ermöglicht so einen faktenbasierten Austausch. (1)

29. Ermöglicht das geplante Vorgehen die Integration verschiedener Aspekte? Die semi-formale Darstellung ermöglicht die Erweiterung um weitere qualitative und quantitative Aspekte. (1)

### **Ansatzorientierte Anforderungen (6,5/7)**

---

30. Unterstützt die Vorgehensweise die Formulierung von situationspezifischen Regeln, die als Varietätsbeschränkungen (Constraints) wirken? Die günstigen Systemeigenschaften sind als allgemeingültige Regeln der Varietätsbeschränkung formuliert. Sie können situationsbedingt angepasst werden. (1)

31. Unterstützt die Vorgehensweise die Ermittlung und Identifikation von Mustern? Die Schritte Segment- und Modulbildung zeigen struktur- und verhaltensorientierte Muster auf. (1)

32. Unterstützt die Vorgehensweise die Schaffung von Freiräumen für die Entfaltung selbstorganisierender Kräfte? Segmente und Module werden als sich relativ autonom organisierende Subsysteme verstanden. (1)

33. Hält die Vorgehensweise die Anwender dazu an, sich ganzheitlich mit dem Gesamtsystem zu befassen? Die günstigen Systemeigenschaften betrachten struktur- und verhaltensorientierte Aspekte des Systems ganzheitlich und konkretisieren die Zusammenhänge für einzelne Grundobjekte. (1)

34. Stellt die Vorgehensweise selbst einen strukturierten Prozess dar? Das Vorgehen lässt sich anhand einer Makro- sowie Mikro-Logik systematisch beschreiben. (1)

35. Führt die Vorgehensweise zum Aufbau von Controlling-Systemen zur Überwachung der Ergebnisse?  
Die Analyseergebnisse können genutzt werden, um ein solches System anhand der entwickelten Kennzahlen aufzubauen. (½)
36. Benutzt die Vorgehensweise systematisch die Möglichkeiten von Modellen?  
Das Vorgehen basiert auf einem etablierten Grundmodell und erweitert dieses. (1)

### **Anleitungsorientierte Anforderungen (6,5/8)**

---

37. Führt das angestrebte Vorgehen in ausreichendem Mass zu anschaulichen Zwischen- und Endergebnissen?  
Die Ergebnisse sind im Produktnetz sowie im Wertstrom im Überblick visualisiert. Einzelergebnisse sind über Datenbalken visualisiert. (1)
38. Wird der Blick im geplanten Vorgehen wiederholt auf die Dynamik des Systems gelenkt und findet eine entsprechende Fokussierung statt?  
Angepasste Box-Plot Diagramme in Form von Datenbalken visualisieren die Dynamik in den Datenkästen. (1)
39. Unterstützt die geplante Vorgehensweise ein experimentelles Vorgehen am Modell und fördert sie die Experimentierfreude der Beteiligten?  
Experimentelles Vorgehen am realen System wird durch die detaillierte Analyse gefördert. Das Beschreibungsmodell kann als Grundlage für ein darauf aufbauendes experimentelles Vorgehen dienen. (½)
40. Führt das geplante Vorgehen zu einer integralen Sicht des untersuchten Systems?  
Die Darstellung in Überblicks- und Detaildarstellungen ermöglicht es verschiedene Aspekte des Systems zu beleuchten. (1)

41. Werden durch das geplante Vorgehen Problemlösungen erarbeitet?
- Im Schritt Ursachenkonsolidierung werden ausgehend von generischen Maßnahmen konkrete Maßnahmen abgeleitet werden. Die Entwicklung der konkreten Lösungen liegt außerhalb des Analysevorgehens. (½)
42. Ist das geplante Vorgehen insofern handlungsorientiert, als dass in den letzten Schritten des Vorgehens Handlungsanweisungen und Ergebniskontrollen vorgesehen sind?
- Handlungsanweisungen und Ergebniskontrollen werden durch das Modell unterstützt werden. Ziel der Ursachenkonsolidierung ist es, konkrete Maßnahmen abzuleiten. (½)
43. Welche Instrumente dienen der Schaffung neuer Strukturen?
- Die strukturorientierten günstigen Systemeigenschaften dienen, kombiniert mit der Analyse, als Anregung zur Strukturveränderung. (1)
44. Welche Instrumente dienen der Verhaltensbeeinflussung?
- Die verhaltensorientierten günstigen Systemeigenschaften dienen, kombiniert mit der Analyse, als Anregung zur Verhaltensbeeinflussung. (1)

---





**Gesamt (40,5/44)**

Anmerkung: An Prüffragen 8, 10 und 39 wurden Tippfehler gegenüber dem Original korrigiert.


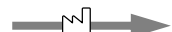


### A.3 Legende der Visualisierungen (Produktnetz und Wertstrom)

#### Legende des Produktnetzes



##### Lager inkl. Dispositionsstrategie

-  Nicht spezifiziert / uneindeutig
-  Verbrauchsorientierte Disposition
-  Bedarfsorientierte Disposition
-  Prognoseorientierte Disposition





##### Module

-  Eigenfertigung
-  Eigenfertigung mit Fremdarbeitsgang
-  Fremdbeschaffung
-  Sicherheitszeit






##### Engpässe

-  Kompletierer
-  Lagerfehlteil







##### Komplettierungsbedingung

- Komplettierung  notwendig  optional
- Verzweigung  notwendig  optional

##### Farbcodierung





- | Modul   | Bewertung   |
|---|---|
|  Istwerte  |  undefiniert |
|  Sollwerte |  Positiv     |
|   |  Negativ     |

##### Terminabweichung




-  Endterminabweichung (zu früh)
-  Endterminabweichung (zu spät)
-  Startterminabweichung (zu früh)
-  Startterminabweichung (zu spät)
-  Durchlaufzeitabweichung (kürzer)
-  Durchlaufzeitabweichung (länger)

### Legende des Wertstroms







#### Puffer inkl. Reihenfolgesteuerung

-  Nicht spezifiziert / uneindeutig
-  Go-See
-  Sollreihenfolge
-  FIFO

#### Engpässe

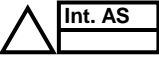

-  Kapazitätsengpass
-  Terminengpass
-  Mix-Flexibilitätsengpass

#### Farbcodierung

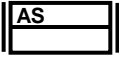
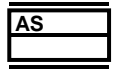
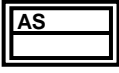
- | Zeitreihe   |           | Bewertung   |             |
|---|-----------|---|-------------|
|  | Istwerte  |  | Undefiniert |
|  | Sollwerte |  | Positiv     |
|  | Zielwerte |  | Negativ     |

#### Arbeitssysteme


##### a) Verantwortungsbereich

-  Internes AS (inkl. Puffer)
-  Externes AS (inkl. Puffer)




##### b) Mehrfachnutzung

-  AS in einem Segment bedient mehrere Module
-  AS in einem Modul bedient mehrere Segmente
-  AS bedient mehrere Module in mehreren Segmenten

##### c) Mehrfachdarstellung

-  Verbindungslinie zwischen mehrfach dargestellten AS

##### d) Materialfluss

-  Hohe Gewichtung
-  Niedrige Gewichtung
-  Keine Gewichtung (möglicher Fluss)



