

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



Fakultät für Maschinenbau

Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Heinicke

geb. am 25.06.1985 in Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hermann Kühnle
Prof. Dr. Till Becker

Promotionskolloquium am 14.12.2017

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb (IAF) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Dem Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb und meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Kühnle, bin ich für die stete Diskussionsbereitschaft und beständige Förderung dieser Arbeit zu besonderem Dank verpflichtet.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr. Till Becker für die Übernahme der Zweitbegutachtung dieser Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Fabrikbetrieb und Produktionssysteme, insbesondere Herrn Dr. Ulf Bergmann, Herrn Gerd Wagenhaus und Herrn Dr. Reinhard Fietz für die Vielzahl an lohnenswerten Hinweisen, beständigen fachlichen Diskussionen und wertvollen Anmerkungen.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, deren Geduld und unbändige Unterstützung maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Potsdam, September 2017

Matthias Heinicke

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Methode zur Beurteilung der Produktionsstruktur eines Unternehmens erarbeitet. Kern dabei ist das Konzept der Resilienz, d. h. die Fähigkeit des Produktionssystems, externe und interne Störungen selbständig abzufangen und möglichst schnell in einen gleichgewichtigen Zustand zurückzukehren.

Zur Beurteilung der Resilienz verschiedener Produktionsstrukturen wird diese Fähigkeit entsprechend quantitativ operationalisiert und um eine umfassende Bewertung der relevanten Kostendimensionen ergänzt. Durch Berücksichtigung sowohl der monetären Effizienz als auch der resilienten Veränderungs- und Anpassungsfähigkeit wird der betriebliche Anwender dahingehend unterstützt, den richtigen Zeitpunkt für angezeigte Strukturadaptionen zu erkennen und die beste Konfigurationsalternative zu identifizieren.

Mittels indikatorbasiertem Strukturcontrolling werden Veränderungsbedarfe aufgedeckt und anschließend deren Potenzial hinsichtlich struktureller Anpassungen ermittelt. Durch die Bestimmung von Referenzwerten für einzelne Strukturdimensionen lässt sich die jeweilige Optimierungsrichtung erkennen. Auf dieser Basis erfolgt die simulationsgestützte Variation von Systemszenarien, die sowohl nachfrageinduzierten Änderungen des Produktionsprogramms als wesentliche Planungsprämisse als auch den subsummierten Beeinträchtigungszuständen innerhalb des Systems Rechnung trägt und die Identifikation zweckmäßiger Strukturkonzepte unterstützt.

Anhand der derart gewonnenen empirischen Daten wird anschließend eine Bewertung der einzelnen Konfigurationsalternativen vorgenommen. Hierbei stehen das Verhältnis von Leistungsfähigkeit im turbulenten Umfeld (Resilienz) sowie die Wirtschaftlichkeit der Strukturlösung (Effizienz) im Mittelpunkt. Dies ermöglicht die Identifikation und Auswahl der vorteilhaftesten Produktionsstruktur unter Berücksichtigung etwaiger Adaptionaufwände. Die Methode zur Beurteilung der Resilienz wird anschließend in einen Regelkreis zur Strukturprüfung eingebettet.

Neben einer ausführlichen Darlegung der Theorien zur Strukturplanung und zu ihrem Betrieb umfasst die Arbeit außerdem eine prototypische Demonstration der Methode anhand eines Praxisbeispiels.

Abstract

In this thesis, a new method for assessing the structure of a production system is developed. The focus is the concept of resilience, i. e. the ability of the production system to cope with external and internal disturbances independently and to return to a balanced state as quickly as possible.

In order to assess the resilience of different production structures, this capability is quantitatively operationalized and supplemented by a comprehensive evaluation of the relevant costs. By taking into account both monetary efficiency and resilient adaptability, the operational user is assisted to recognize the right time for structural adaptations and to identify the best configuration alternatives.

By means of indicator-based structural control, changes are identified and the potential for structural adjustments is determined. By determining reference values for specific structural dimensions, the respective optimization can be identified. On this basis, the simulation-based variation of scenarios takes into account both the demand-induced change of the production program as essential planning premisses and the subsumed disturbances within the system. Additionally, the identification of appropriate structural concepts is enabled.

On the basis of the empirical data obtained in this way, an evaluation of the individual configuration alternatives is subsequently carried out. The focus is on the ratio of performance in the turbulent environment (resilience) and the efficiency of the structural solution (efficiency). This enables the identification and selection of the most advantageous production structure taking into account possible adaptation costs. The method for assessing the resilience is then embedded in a control loop.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT DES VERFASSERS	I
KURZFASSUNG	II
ABSTRACT	III
INHALTSVERZEICHNIS	1
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	3
TABELLENVERZEICHNIS.....	5
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	6
1 EINLEITUNG	7
2 PRODUKTIONSSYSTEME IM KONTEXT DER VARIANTENREICHEN SERIENFERTIGUNG	10
2.1 Fabrik als soziotechnisches System.....	10
2.1.1 Charakteristika von Produktionssystemen	10
2.1.2 Typologie der variantenreichen Serienfertigung.....	14
2.2 Aspekte der Planung und des Betriebens von Produktionssystemen	16
2.2.1 Planung und Auslegung von Produktionssystemen.....	17
2.2.2 Betreiben und Optimieren von Produktionssystemen	20
2.3 Veränderungs- und Anpassungsbedarf von Produktionssystemen	24
2.3.1 Turbulenz des Unternehmensumfelds	26
2.3.2 Komplexität von Produktionssystemen.....	28
2.4 Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen	29
2.4.1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit	30
2.4.2 Robustheit und Resilienz	32
2.5 Handlungsbedarf für die Veränderungsfähigkeit in der Praxis	35
3 ANSÄTZE ZUR BEWERTUNG RESILIENTER PRODUKTIONSSTRUKTUREN	37
3.1 Konfigurationsparameter von Produktionsstrukturen	37
3.1.1 Parameter des Systemaufbaus	37
3.1.2 Parameter des Systemverhaltens.....	40
3.1.3 Stellgrößen der Produktionsstruktur	43
3.2 Kennzahlen zur Bewertung von Produktionsstrukturen	44
3.2.1 Bewertung der Aufbaustruktur	46
3.2.2 Bewertung der Ablaufstruktur.....	49
3.2.3 Bewertung des Systemverhaltens	52
3.2.4 Bewertung der Veränderungsfähigkeit	56
3.3 Ermittlung des Forschungsbedarfs.....	59

4	ZIELSTELLUNG DER ARBEIT	61
5	BEURTEILUNG DES VERÄNDERUNGSBEDARFS VON PRODUKTIONSSTRUKTUREN	64
5.1	Beurteilung der Eignung von Produktionsstrukturen	65
5.1.1	Überprüfen der funktionalen Struktur	66
5.1.2	Überprüfen der räumlichen Struktur.....	68
5.1.3	Überprüfen der zeitlichen Struktur	69
5.2	Beurteilung der Resilienz von Produktionsstrukturen	71
5.2.1	Kontinuierliche Strukturüberwachung	71
5.2.2	Ermittlung der leistungsorientierten Resilienz	72
5.3	Kennzahlensystem des Strukturcontrollings.....	77
6	RESILIENZORIENTIERTE BEURTEILUNG VON PRODUKTIONSSTRUKTUREN	79
6.1	Ermittlung des Veränderungspotenzials von Produktionsstrukturen.....	79
6.1.1	Eignungsorientierte Anpassung der funktionalen Struktur	80
6.1.2	Eignungsorientierte Anpassung der räumlichen Struktur	82
6.1.3	Eignungsorientierte Anpassung der zeitlichen Struktur	84
6.1.4	Resilienzorientierte Anpassung der Produktionsstruktur	87
6.2	Simulationsgestützte Entwicklung alternativer Strukturkonzepte	89
6.2.1	Erstellung von Systemszenarien	90
6.2.2	Systematische Versuchsplanung	92
6.3	Resilienzorientierte Bewertung von Strukturalternativen	94
6.3.1	Identifikation von Kostentreibern	95
6.3.2	Zuordnung strukturabhängiger Kosten	100
6.3.3	Systematische Kosten-Leistungsbeurteilung.....	104
6.4	Zusammenfassung zum Regelkreis der Strukturbeurteilung	107
7	ANWENDUNG DER METHODIK IN DER PRAXIS	111
7.1	Beschreibung des Ausgangszustandes	111
7.2	Variation des Belastungsszenarios.....	113
7.3	Variation des Beanspruchungsszenarios.....	116
7.4	Resilienzorientierte Bewertung exemplarischer Strukturkonzepte.....	118
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	120
	LITERATURVERZEICHNIS	122
	ANHANG	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Spannungsfeld zwischen Effizienz und Resilienz (vgl. [GOER09])	8
Abbildung 1-2: Struktur der Arbeit	9
Abbildung 2-1: Hierarchische Betrachtungsebenen des Systems Fabrik	11
Abbildung 2-2: Arbeitssystem	12
Abbildung 2-3: Betrachtungsebenen bei der Charakterisierung von Produktionsstrukturen	13
Abbildung 2-4: Dichotomie von Strukturgestaltung und –betrieb (vgl. [WEST99])	17
Abbildung 2-5: Auftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (vgl. [HACK89])	21
Abbildung 2-6: Die Produktion im betrieblichen Regelkreis	22
Abbildung 2-7: Konfiguration der Produktionsplanung und -steuerung [LÖDD08]	22
Abbildung 2-8: Balance zwischen Stabilität und Elastizität.....	23
Abbildung 2-9: Zusammenhang von Variation, Fluktuation und Variabilität.....	24
Abbildung 2-10: Entstehen von Veränderungs- und Anpassungsbedarfen	25
Abbildung 2-11: Dimensionen der Veränderungsfähigkeit [WIEN02a]	31
Abbildung 3-1: Wechselwirkung der PPS-Funktionen.....	40
Abbildung 3-2: Maßnahmen der Kapazitätsabstimmung	42
Abbildung 3-3: Konfigurationsparameter von Produktionsstrukturen	43
Abbildung 3-4: Stellhebel zur Strukturadaption	44
Abbildung 3-5: Unterschiedliche Aspekte der Bewertung von Produktionsstrukturen.....	45
Abbildung 3-6: Formen des Intensitätsverlaufs [WIRT89]	51
Abbildung 3-7: Kalkulationsschema der Herstell- und Selbstkosten	54
Abbildung 3-8: Zielgrößenabhängige Wahl des Betriebspunktes	55
Abbildung 3-9: Resilienz-Dreieck (vgl. [ADAM12])	58
Abbildung 3-10: Wechselwirkungen der strukturellen Ebenen	60
Abbildung 4-1: Ansatz zur Strukturregelung	61
Abbildung 4-2: Zusammenfassende Einordnung der Arbeit	63
Abbildung 5-1: Auslöser der Überprüfung von Produktionsstrukturen.....	64
Abbildung 5-2: Überprüfung der Eignung einer Produktionsstruktur	66
Abbildung 5-3: Indikatoren für die Prüfung der funktionalen Struktur	67
Abbildung 5-4: Indikatoren für die Prüfung der räumlichen Struktur.....	68
Abbildung 5-5: Indikatoren für die Prüfung der zeitlichen Struktur	70
Abbildung 5-6: Überprüfung der Resilienz einer Produktionsstruktur	71
Abbildung 5-7: Kennzahlen für die Überwachung des Systemverhaltens	72
Abbildung 5-8: Leistungsorientierte Resilienzbeurteilung.....	73
Abbildung 5-9: Kenngrößen der leistungsorientierten Resilienzbeurteilung.....	74
Abbildung 5-10: Kennzahlensystem der Strukturprüfung bzw. -überwachung	77
Abbildung 6-1: Vorgehen zur Strukturbeurteilung	79

Abbildung 6-2: Ermittlung des Veränderungspotenzials von Produktionsstrukturen	80
Abbildung 6-3: Strukturadaption infolge der Prüfung der funktionalen Struktur	82
Abbildung 6-4: Strukturadaption infolge der Prüfung der räumlichen Struktur	83
Abbildung 6-5: Strukturadaption infolge der Prüfung der zeitlichen Struktur.....	86
Abbildung 6-6: Strukturadaption infolge der Prüfung der Resilienz	87
Abbildung 6-7: Entstehen von temporären Störstrukturen	87
Abbildung 6-8: Strategien zur Resilienzerhöhung	88
Abbildung 6-9: Vorgehen zur resilienzorientierten Potenzialbeurteilung	90
Abbildung 6-10: Strukturprüfung mittels Simulation von Systemszenarien	91
Abbildung 6-11: Kostenverursachung durch Inanspruchnahme der Produktionsstruktur	95
Abbildung 6-12: Ansatz zur Ermittlung strukturabhängiger Kosten	95
Abbildung 6-13: Strukturabhängiger Zusammenhang von Kostenverursachung und -beeinflussung.....	96
Abbildung 6-14: Relevante Strukturkosten	97
Abbildung 6-15: Kopplung von Auftrags- und Ressourcensicht	100
Abbildung 6-16: Kostenbestandteile der Aufbaustruktur	101
Abbildung 6-17: Kostenbestandteile der Ablaufstruktur	104
Abbildung 6-18: Einflussfaktoren und Bestandteile strukturabhängiger Kosten	105
Abbildung 6-19: Kosten der Strukturadaption	105
Abbildung 6-20: Exemplarisches Kosten-Leistung-Verhältnis bei unterschiedlicher Systemlast.....	106
Abbildung 6-21: Iteratives Vorgehen zur Strukturbeurteilung	107
Abbildung 6-22: Regelkreis der Strukturbeurteilung	109
Abbildung 7-1: Arbeitsfolgen des Produktionsprogramms (t_0)	112
Abbildung 7-2: Materialflussmatrix des Produktionsprogramms (t_0)	113
Abbildung 7-3: Arbeitsfolgen des Produktionsprogramms (t_1)	114
Abbildung 7-4: Materialflussmatrix des Produktionsprogramms (t_1)	114
Abbildung 7-5: Blocklayouts (links: bisheriger Zustand, rechts: neue Anordnung)	115
Abbildung 7-6: Leistungsverlauf bei Ausfall des Externen	116
Abbildung 7-7: Leistungskurve bei verringerter Losgröße	117
Abbildung B-1: Vorgehen zur Prüfung der Struktureignung	V
Abbildung B-2: Vorgehen zur Beurteilung der funktionalen Struktur.....	VI
Abbildung B-3: Vorgehen zur Beurteilung der räumlichen Struktur	VII
Abbildung B-4: Vorgehen zur Beurteilung der zeitlichen Struktur	VIII
Abbildung C-1: Erweiterung des Robustheitsfokus auf die Strukturebenen	IX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Betriebstypologie der variantenreichen Serienfertigung.....	15
Tabelle 2-2: Fälle der Veränderung des Produktionsprogramms	27
Tabelle 3-1: Übersicht potenzieller Strukturbildungskriterien	38
Tabelle 3-2: Ausprägungen von Kennzahlensystemen	45
Tabelle 3-3: Systematisierung von räumlichen Strukturkennzahlen	48
Tabelle 3-4: Systematisierung von zeitlichen Strukturkennzahlen	51
Tabelle 6-1: Zustände des Potenzialfaktors Mensch.....	98
Tabelle 6-2: Zustände des Potenzialfaktors Maschine	98
Tabelle 6-3: Zustände und Zeitanteile des Potenzialfaktors Material	99
Tabelle 7-1: Systemzusammensetzung und Kapazitäten	112
Tabelle 7-2: Kostenvergleich der Systemszeanrien.....	119
Tabelle D-1: Entfernungsmatrizen des Belastungsszenarios	X
Tabelle E-1: Berechnung minimaler Bestand bei Vollauslastung.....	XI
Tabelle E-1: Berechnung minimale Durchlaufzeit	XI
Tabelle E-1: Berechnung maximale Leistung	XII
Tabelle F-1: Leistungskenngrößen aus den Simulationsdurchläufen.....	XIII
Tabelle F-2: Empirische Ergebniswerte der Simulationsdurchläufe	XIII
Tabelle G-1: Bearbeitungs- und Rüstkosten.....	XIV
Tabelle G-1: Lagerkosten	XIV

Abkürzungsverzeichnis

α	Agilität
β	Sensitivität
Δ	Variationskoeffizient
B	Bestand
BKT	Betriebskalendertag
B_{\min}	minimaler Bestand bei Vollauslastung (Referenzwert)
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BP	Betriebspunkt
ConWIP	Constant-Work-in-Process
DB	Deckungsbeitrag
DLZ	Durchlaufzeit
DLZ_{\min}	minimale Durchlaufzeit (Referenzwert)
FGK	Fertigungsgemeinkosten
L	Leistung
L_{\max}	maximale Leistung (Referenzwert)
M	mittlere Belastung
MI	Mengenindex
MRP	Material Requirements Planning
P	Vektorgrad
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
VI	Vielfaltsindex
VWP	Vorrichtungen, Werkzeuge, Prüfmittel
X	Verflechtungsgrad
ZAU	Auftragszeit

1 Einleitung

Die Planung eines Produktionssystems ist nur dann valide, wenn sich die Rand- und Rahmenbedingungen in ihren Gültigkeitsgrenzen nicht verschieben. Doch genau dieser Zustand tritt auf Grund der globalen Vernetzung von Absatz- und Beschaffungsmärkten immer kurzzyklischer und mit immer geringerer Prognostizierbarkeit auf. Nicht nur große Konzerne z. B. der Automobilindustrie, die sich gerade der Elektrifizierung des gesamten Antriebstrangs wegen vor einer umwälzenden Herausforderung befindet, sondern auch kleine und mittlere Unternehmen sehen sich einem steten Wandel ihres Umfelds und der an sie und ihre Produkte gestellten Leistungsanforderungen ausgesetzt. Insbesondere Betriebe mit variantenreicher Serienfertigung weisen eine hohe Kunden- bzw. Marktorientierung auf und sind trotz der vielfältigen Produktpalette bestrebt, möglichst effizient zu produzieren, nicht nur um den Prinzipien der Wirtschaftlichkeit Genüge zu tun, sondern auch um die strikten Zeitanforderungen in Form kurzer Lieferzeiten und hoher Termintreue gerecht zu werden. Zudem sorgen die kontinuierlichen Anpassungen und Verbesserungen der Produktionsprozesse und genutzten Technologien dafür, dass die bestehende Konfiguration eines Produktionssystems fortwährend in Frage gestellt wird.

Die zunehmende globale Vernetzung von Absatz- und Beschaffungsmärkten sorgt damit für einen grundlegenden Wandel, dessen Auswirkungen sich für einzelne Unternehmen nicht klar abgrenzen lassen, da durch die Vielzahl der Akteure und Einflussgrößen die Unvorhersagbarkeit der Ereignisse steigt, was vor allem die variantenreichen Serienfertiger sehr sensibel auf Änderungen der Kundennachfrage reagieren lässt. Um den wechselnden Aufgaben dieses turbulenten Umfelds gerecht zu werden, bedarf es einer ausgeprägten Anpassungsfähigkeit auf Gesamtsystemebene, die den geänderten Produktionsbedingungen Rechnung trägt. Insofern bleibt die Anpassung der bestehenden Systemkonfiguration früher oder später unausweichlich, auch wenn der konkrete Zeitpunkt und die Richtung selten im Voraus bestimmbar sind. Insbesondere für das produzierende Gewerbe bedeutet dies in letzter Konsequenz permanente kurzzyklische Modifikationen der Fabrik- und Produktionsstrukturen bis hin zur Veränderung grundsätzlicher Organisationsprinzipien der Fertigung [GRUN12]. Für die Planung von Produktionssystemen ergibt sich daraus die Anforderung, die in immer kürzeren Zeitabschnitten wiederkehrenden Rekonfigurationsaufgaben mit geeigneten Methoden und Vorgehensweisen zu unterstützen [WEST99], [WEST00]. Während des Fabrikbetriebs bedarf es stattdessen einer fortwährenden Verifikation der bestehenden Produktionsstruktur angesichts wechselnder Leistungsanforderungen.

Allerdings widerspricht die Fokussierung einzig auf die Wandelbarkeit der eigenen Strukturen dem Grundgedanken ökonomischen Handelns, das die Wirtschaftlichkeit als Kern der unternehmerischen Wettbewerbsfähigkeit in den Mittelpunkt stellt. Stattdessen ist für den nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg eine passende betriebliche Positionierung im Spannungsfeld zwischen Effizienz und Veränderungsfähigkeit erforderlich (Abbildung 1-1). Insbesondere der Aspekt der Variabilität als Fähigkeit von Produktionssystemen die Turbulenz des Umfeldes durch Anpassung oder Widerstandsfähigkeit zu bewältigen, wird in der wissenschaftlichen Literatur unter dem Begriff Resilienz diskutiert [MUNO15], [WIEL13], [WIEL12], [ASBJ99]. Während ein zu hohes Maß an Veränderungsfähigkeit eine effiziente Leistungserstellung hemmt und den Aufbau kostenseitiger Wettbewerbsvorteile erschwert [BURM02], kann eine zu träge oder ausbleibende Anpassung an das turbulente Umfeld dazu führen, dass ein Unternehmen den Anforderungen des Wettbewerbs nicht mehr genügt und dadurch aus dem Markt gedrängt wird [DAS95]. Insofern ist eine angemessene Balance aus wirtschaftlicher Optimierung und ausreichendem Anpassungspotenzial zu finden [GOER09].

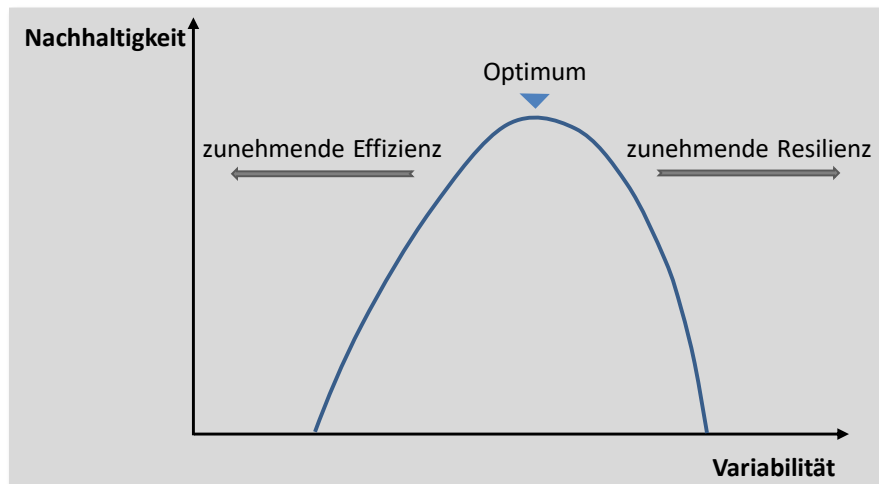


Abbildung 1-1: Spannungsfeld zwischen Effizienz und Resilienz (vgl. [GOER09])

Der Beherrschungsgrad eines Produktionssystems im turbulenten Umfeld im Sinne der Zuverlässigkeit der Arbeitsausführung bzw. Funktionserfüllung hängt vordergründig von dessen struktureller Konfiguration sowie deren Variabilität bzw. Stabilität ab. Dies erfordert eine gezielte Verifizierung der Passfähigkeit von bestehender Systemstruktur und zu erfüllenden Produktionsaufgaben vor dem Hintergrund der betrieblichen Ziele. Jedoch fehlt es den betrieblichen Akteuren diesbezüglich an einer adäquaten Maßzahl.

Vor diesem Hintergrund rückt die Bewältigung der entstehenden Herausforderungen in den Fokus. Daher kommt der Etablierung eines ausgewogenen Verhältnisses von effizienter Funktionserfüllung und resilienter Fähigkeit zum Umgang mit unvorhergesehenen Einflussgrößen, die mitunter eine Adaption der Konfiguration des Produktionssystems erfordern, zur Sicherung einer nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit eine besondere Bedeutung zu. Der fortwährende Abgleich der bestehenden Produktionsstrukturen mit dem betrieblichen Umfeld trägt zur Sicherung des langfristigen Unternehmenserfolges bei. In Anbetracht dieser Spannungslage zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, dem Anwender eine Hilfestellung bei der Überprüfung der Konfiguration von Produktionssystemen zu geben.

Daher soll mit der vorliegenden Arbeit eine Methode zur resilienzorientierten Verifikation und Beurteilung von Produktionsstrukturen entwickelt werden, die die betrieblichen Akteure in der variantenreichen Serienfertigung in die Lage versetzt, erforderliche Anpassungsbedarfe zu erkennen und geeignete Maßnahmen auszuwählen. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Kennzahlen und integrierten Regelkreisen zur kontinuierlichen sowie anlassbezogenen Strukturüberprüfung als Beitrag zur Sicherung der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Der Betrachtungsgegenstand sind die strukturellen Dimensionen sowie Resilienz- und Effizienzaspekte. Auf eine enge Kopplung zwischen dem laufenden Strukturbetrieb und der nachfolgenden Umgestaltung ist dabei zu achten. Anhand eines empirischen Anwendungsfalls erfolgt die Verifizierung der Methode. Der Nutzen für die industrielle Praxis wird so nachgewiesen.

Hierzu wird die folgende Vorgehensweise zur Methodenentwicklung angewendet (Abbildung 1-2):

Ausgehend von der Diskussion der Problemstellung der Arbeit erfolgt im 2. Kapitel die Eingrenzung auf die Spezifika der variantenreichen Serienfertigung im Kontext veränderungsfähiger Produktionssysteme. Hierzu werden zum einen die Planungs- und Betriebszyklen von Produktionsstrukturen untersucht und zum anderen unterschiedliche Veränderungsbedarfe bzw. -auslöser in ihrer Wirkungsweise

beleuchtet. Darüber hinaus erfolgt die Vorstellung relevanter Konzepte im Kontext der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen. Die erlangten Erkenntnisse werden als Handlungsbedarf subsummiert.

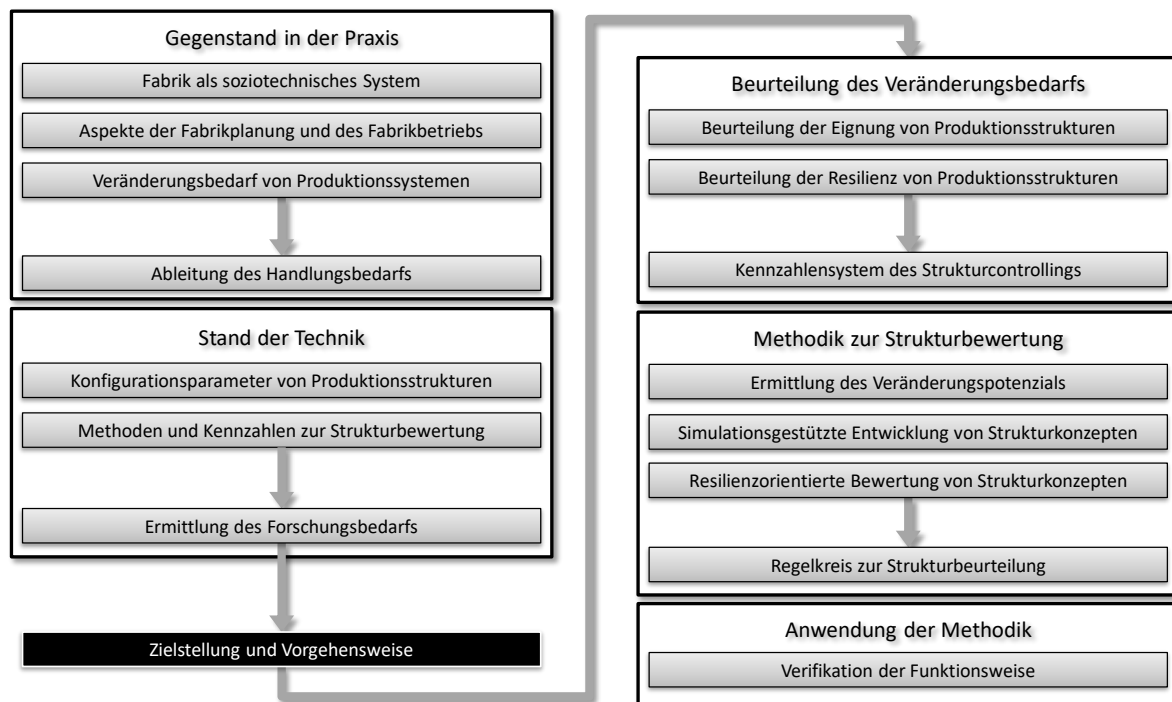


Abbildung 1-2: Struktur der Arbeit

Im 3. Kapitel werden die Grundlagen zur Entwicklung der Methode zur Strukturüberprüfung gelegt. Zunächst erfolgt eine Systematisierung bestehender Konfigurationsparameter. Darauf baut die Darlegung der wichtigsten Ansätze zur Strukturprüfung auf, bei denen der Fokus insbesondere auf Methoden und Kennzahlen zur Bewertung von Konfigurationen und deren Variabilität liegt. Abschließend wird daraus der Forschungsbedarf abgeleitet.

Vor dem Hintergrund der Anforderungen an die Methode wird in Kapitel 4 die Zielstellung der Arbeit präzisiert. In Kapitel 5 erfolgt die Entwicklung von Indikatoren zur Identifikation des Veränderungsbedarfs von Produktionssystemen auf Basis der Überprüfung einzelner Strukturdimensionen. Die Erkenntnisse werden als Kennzahlensystem des Strukturcontrollings zusammengefasst.

Im Rahmen der resilienzorientierten Beurteilung von Produktionssystemen wird in Kapitel 6 ein Regelkreis zur Verifikation und Überprüfung der bestehenden Produktionsstruktur und alternativer Konfigurationen aufgebaut. Dazu erfolgt die Ermittlung des Veränderungspotenzials sowie die Ableitung eines Vorgehens zur Identifikation bestehender Handlungsoptionen der Strukturadaptation. Weiterhin wird ein einheitlicher Maßstab zur Bewertung von Konfigurationen unter Berücksichtigung von Resilienz und Effizienz definiert, der es letztlich ermöglicht, die beste Strukturalternative zu bestimmen.

In Kapitel 7 erfolgt die Erprobung der Praxistauglichkeit am empirischen Anwendungsfall. Hierbei werden im Besonderen die reaktive Strukturverifikation sowie die Bewertung prospektiver Adaptionen dargestellt.

Abschließend erfolgen in Kapitel 8 eine Zusammenfassung der entwickelten Methode sowie ein Ausweis von weiterführenden Forschungsbedarfen.

2 Produktionssysteme im Kontext der variantenreichen Serienfertigung

In diesem Kapitel werden ausgehend von den Möglichkeiten einer grundlegenden Charakterisierung von Produktionssystemen die Erfordernisse zur Anpassung bestehender Strukturen vorgestellt und erläutert. Zu Beginn ist es allerdings notwendig, die wesentlichen Begriffe dieser Arbeit zu definieren, um ein einheitliches Verständnis zu gewährleisten.

Deshalb wird zunächst die Fabrik sowie die Produktionsstruktur aus systemtheoretischer Perspektive definiert und abgegrenzt, um daraufhin die wesentlichen Ausprägungen über geeignete betriebstypologische Merkmale zu klassifizieren. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf die genaue Abgrenzung des Untersuchungsbereichs der Arbeit.

Im Fortgang werden das grundsätzliche Vorgehen der Planung und Gestaltung von Produktionssystemen vorgestellt und relevante Aspekte für den anschließenden Betriebs- und Optimierungszyklus herausgearbeitet.

Des Weiteren werden unterschiedliche Auslöser für die Anpassung und Rekonfiguration etablierter Produktionsstrukturen systematisiert und vor diesem Hintergrund die Begriffe der Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Robustheit und Resilienz im betriebsorganisatorischen Kontext definiert. Daraus resultiert die epistemologische Ableitung der Charakteristik resilienter Produktionssysteme.

2.1 Fabrik als soziotechnisches System

In diesem Abschnitt werden die systemtheoretischen Grundlagen und der Aspekt-System-Ansatz als Beschreibungsmodell von Produktionssystemen erläutert.

Die Systemtheorie ist ein wissenschaftlicher Ansatz zur Untersuchungen und Beschreibung der Ebenen, der Bestandteile sowie der divergierenden Ausprägungen von Systemen, und zielt diesbezüglich auf ein vereinfachtes, modellhaftes Verständnis derselben ab [BERT71]. Aus ihr gehen generelle deskriptive Kategorien hervor, die eine Klassifikation von Systemen unterstützen und deren interne und externe Wirkbeziehungen charakterisieren (vgl. [KÜHN15], [PATZ82], [ROPO12]).

Ein System stellt allgemein eine Gesamtheit von Elementen, den zwischen ihnen bestehenden Relationen und den resultierenden Eigenschaften dar [ROPO09]. Dabei kann die Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente in einem bestimmten Zusammenhang bzw. abhängig von der Betrachtungsweise als Ganzes gesehen und von ihrer Umgebung als abgegrenzt angesehen werden [DIN60050]. Auf Grund ihres ganzheitlichen Ansatzes ermöglicht es die Systemtheorie, sowohl einzelne Gesichtspunkte explizit zu betrachten als auch diese in einen Zusammenhang zu bringen [KÜHN15]. Daraus resultiert eine Komplexitätsreduzierung, wenn ausschließlich die markanten Aspekte des Systems berücksichtigt und die weniger relevanten aus der Untersuchung ausgeschlossen werden. Dadurch wird trotz der eventuell vorherrschenden Opazität eine ganzheitliche Analyse des betrachteten Systems unterstützt. Die Universalität dieses Ansatzes sorgt dafür, dass auch die Fabrik mit all ihren praktischen Problemen und Anforderungen als Systemmodell aufgefasst und aus verschiedenen Sichten betrachtet werden kann [ROPO09].

2.1.1 Charakteristika von Produktionssystemen

Fabriken als Produktionsstätten sind als reales, offenes, künstliches, komplexes, probabilistisches und dynamisches System aufzufassen [SCHE14]. Demnach existieren sie grundsätzlich als von Menschenhand geschaffene (*künstlich*) Materie der objektiven Realität (*real*), die von ihrer Umwelt zwar abgegrenzt ist, aber in wechselseitiger Austauschbeziehung mit ihr steht (*offen*). Der komplexe Charakter ergibt sich zum einen aus der Vielzahl der Elemente und der Verschiedenartigkeit ihrer Beziehungen

zueinander und zum anderen aus der Dynamik der Wechselwirkungen und den Veränderungen über die Zeit (*dynamisch* und *komplex*), die stochastischen Einflüssen unterworfen sind (*probabilistisch*).

Auf Grund dieser Eigenschaften kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass ein Produktionsbetrieb kein triviales Untersuchungsobjekt darstellt. Insbesondere seine Komplexität und Dynamik machen es erforderlich, zunächst eine geeignete – zumindest gedankliche – Strukturierung des Systems vorzunehmen. Ein zentraler Aspekt bei der Betrachtung der Fabrik als System ist der Abstraktionsgrad. Während Elemente die kleinsten, nicht weiter sinnvoll zerlegbaren Einheiten repräsentieren, lässt sich jedes System wiederum als Element eines übergeordneten Systems (Supersystem) und jedes Element umgekehrt als Gesamtheit von untergeordneten Elementen (Subsysteme) auffassen (vgl. [ROPO09]). Diese hierarchische Sichtweise ermöglicht es (Abbildung 2-1), unterschiedliche Organisationseinheiten mit dem Systembegriff kaskadisch zu beschreiben. So können ganze Konzerne sowie Fabriken oder einzelne Arbeitsplätze jeweils als Systeme angesehen werden.

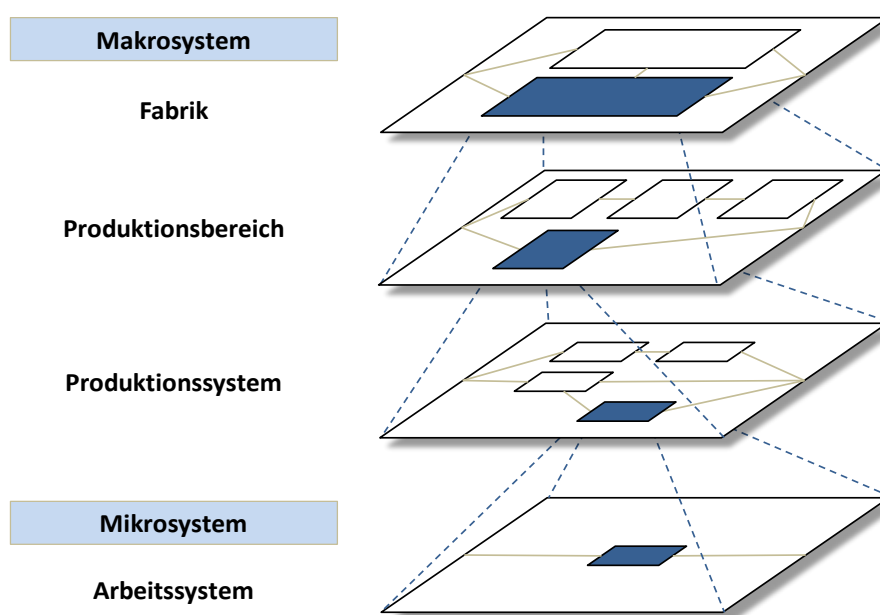


Abbildung 2-1: Hierarchische Betrachtungsebenen des Systems Fabrik

In diesem Zusammenhang stellt das Arbeitssystem (Abbildung 2-2) die kleinste Einheit der Allokation der elementaren Potenzialfaktoren dar und kann vereinfacht als Input-Output-System aufgefasst werden, in dem durch das Zusammenwirken technischer (Arbeitsmittel bzw. Maschinen) und personeller Ressourcen (Arbeitskraft bzw. Mensch) gemäß der gestellten Arbeitsaufgabe (Funktion), die den Arbeitsablauf bestimmt, ein Ausgangszustand eines Arbeitsgegenstandes (Material bzw. Auftrag) in einen definierten Endzustand überführt wird [GUTE84], [KETT84], [REFA93]. Dies geschieht innerhalb gedachter oder physischer Grenzen, die das System von seiner Umwelt trennen.

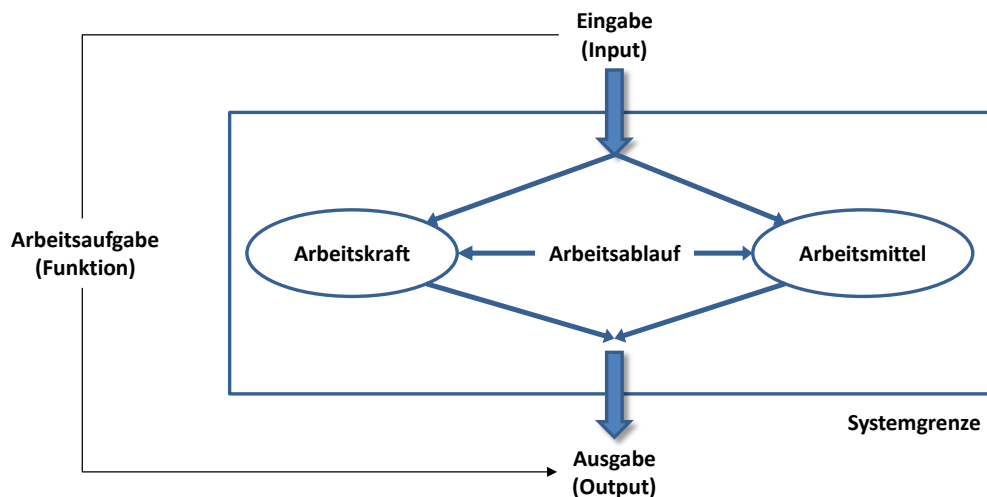


Abbildung 2-2: Arbeitssystem

Arbeitskräfte stellen alle ständig oder regelmäßig am Arbeitsablauf beteiligten Menschen in ihren unterschiedlichen betrieblichen Rollen und mit ihrem Arbeitsvermögen im Sinne personeller Ressourcen dar. Unter Arbeitsmitteln werden alle technischen Ressourcen bzw. Betriebsmittel wie z. B. Roboter, Maschinen, Anlagen sowie Vorrichtungen als Bestandteil des betrachteten Arbeitssystems subsumiert, wenn sie direkt oder indirekt zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe beitragen. Dazu zählen alle nutzbaren technischen Potentialfaktoren, die ihr Leistungspotential zeitbedingt, nutzungsbedingt oder beides sukzessiv über ihre Nutzungsdauer abgeben [ZEHB96], [HILD05], [POHL14]. Arbeitsgegenstände sind wiederum alle Stoffe, Energien und Informationen, die im Arbeitssystem entsprechend der Arbeitsaufgabe verändert werden. Insofern können Arbeitskräfte und Arbeitsmittel als Potentialfaktoren angesehen werden, die ein über einen längeren Zeitraum unveränderliches Nutzungspotential darstellen. Die Summe der Produktionsfaktoren stellt somit die Ressourcenbasis für die Leistungserstellung dar. Die Betrachtung der wechselseitigen Wirkbeziehungen zwischen personellen und technischen Ressourcen führt zum Modell des soziotechnischen Systems [ROPO09], [HILD05], [SYDO85]. Somit lässt sich aus systemtheoretischer Sicht ein Produktionssystem vereinfacht als eine organisatorisch selbständige Allokation von Potentialfaktoren in Form von Leistungseinheiten zur Erfüllung einer definierten Aufgabe (Herstellung von Gütern) zusammenfassen (vgl. [WÖRT04]).

In diesem Kontext stellen die Beziehungen zwischen den jeweiligen Elementen eine Ordnung unter den Elementen her. Daraus ergibt sich wiederum die Struktur, welche als Ordnungsprinzip aufgefasst werden kann, nach dem ein System aufgebaut [SCHE14]. Während beim Systembegriff die Elementemenge im Vordergrund steht, innerhalb der Relationen existieren, rücken die Beziehungen zwischen diesen Elementen (Relationsmenge) bei der Strukturdefinition in den Fokus [RIE01]. Die Struktur bezeichnet somit das gesamte Beziehungsgeflecht innerhalb eines Systems [PAWE08] und enthält dennoch wesentliche Informationen über die gesamtsystemische Charakteristik. Dabei existieren nicht nur Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den Elementen, sondern stets auch Neben- und Wechselwirkungen. Dies führt dazu, dass ein System als Ganzes Eigenschaften besitzt, die sich aus der strukturellen Ordnung ergeben und somit nicht unmittelbar auf seine einzelnen Bestandteile zurückzuführen sind [MARK91].

Die **Produktionsstruktur** stellt damit das inhärente Gefüge eines Produktionssystems dar (vgl. [POHL14]). Ihre Synthese dient der Verfolgung bestimmter Ziele und somit einem definierten Zweck [PATZ82], da sie gleichzeitig die möglichen Systemfunktionen festlegt. Demnach ist durch eine entsprechende funktionelle Kopplung der Systemelemente über die Relationsmenge zu einer passenden

Gesamtstruktur eine derartige Ordnung anzustreben, die es dem System ermöglicht, die notwendige bzw. geforderte Verhaltensweise zu entwickeln bzw. eine definierte Funktion zu erfüllen [BECK77].

Die Konfiguration beschreibt die konkrete strukturelle Ausgestaltung eines Produktionssystems. Dabei lässt sich die Produktionsstruktur selbst ebenfalls unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachten (Abbildung 2-3):

1. Ebene: Menge der ortsveränderlichen oder ortsgebundenen Ressourcenelemente
2. Ebene: physische Beziehungen zwischen den ortsgebundenen Elementen
3. Ebene: funktionale Beziehungen zwischen den Elementen als Art und Weise des chronologischen Zusammenwirkens ortsveränderlicher und ortsgebundener Ressourcen

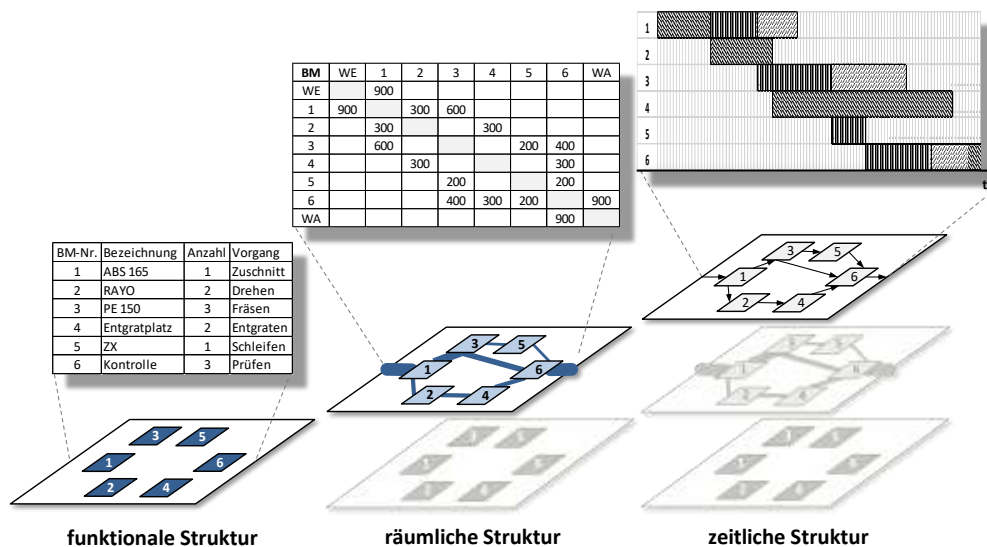


Abbildung 2-3: Betrachtungsebenen bei der Charakterisierung von Produktionsstrukturen

So geht bereits die hierarchische Strukturierung einer Fabrik mit der Bildung von Leistungseinheiten (hier: Produktionssystemen) einher. Die Existenz und Gesamtheit der Potenzialfaktoren (Arbeitskraft, Arbeitsmittel, Arbeitsgegenstand) und damit die elementare Zusammensetzung eines derartig definierten Produktionssystems (Art und Anzahl der Elementemenge bzw. Systemzusammensetzung) bestimmen bereits dessen (potenzielle) Funktionalität, weshalb dieser Aspekt als **funktionale Struktur** bezeichnet wird (Ebene 1). Dies beinhaltet gemeinhin den geordneten Aufbau eines Produktionsbetriebes nach festgelegten produktionstechnischen, logistischen und organisatorischen Kriterien zu definierten (funktionalen) Leistungseinheiten (vgl. [PAWE08]). Infolgedessen wird die produktionssystembezogene Arbeitsteilung als übergeordnete Struktur des Gesamtsystems (Fabrik) impliziert.

Dabei erfolgt die räumlich-zeitliche Zusammenfassung und Ordnung der Systemelemente innerhalb der derart gebildeten Produktionssysteme vor dem Hintergrund der jeweils angestrebten Funktionalität. In diesem Zusammenhang werden die Verknüpfungen zwischen Systemelementen in zweistellige, d. h. anordnungsrelevante Beziehungen, und mehrstellig-dynamische Relationen, d. h. Prozesse bzw. Abläufe im Sinne funktioneller Arbeitsfolgen, unterschieden (vgl. [LAND15], [HILD05]). Hierbei beschreiben erstere die Art, Richtung und Intensität physischer Verknüpfungen zwischen zwei Systemelementen, die je nach Eigenschaft und Anzahl der verbundenen Einheiten maßgeblich für deren örtliche Anordnung zueinander sind. Die entstehende Topologie ortsunveränderlicher Potenzialfaktoren/Ressourcenelemente, die sich in der Maschinenanordnung bzw. im Produktionslayout widerspiegelt [SCHM70], wird als **räumliche Struktur** bezeichnet (Ebene 2). Gemeinsam mit der Systemzusammensetzung bildet sie die statische Aufbaustruktur (vgl. [ACKE07]).

Prozesse werden hingegen über technologische Funktionen charakterisiert. Ihre **zeitliche Struktur** ergibt sich aus der Art, Anzahl und Reihenfolge aller ressourcenbezogenen Operationsfolgen, die über die funktionale Verknüpfung von mehr als zwei Systemelementen realisiert werden können (Ebene 3). Dies betrifft den auftragsbezogenen Teiledurchlauf (Ortveränderung der Arbeitsgegenstände) und den mitarbeiterbezogenen Bedienungsgang (Ortsveränderung der Arbeitskräfte) [SCHM70] und trägt wesentlich zur Funktionserfüllung des Systems bei. Damit stellt die zeitliche Struktur vor dem Hintergrund der bestehenden Aufbaustruktur die dynamische Ablaufstruktur der Leistungseinheit dar und bestimmt entscheidend das Verhalten des Produktionssystems (vgl. [ACKE07]).

Die Funktion der Fabrik als Produktionsstätte ist die Herstellung von Sachgütern [HILD05]. In diesem Zusammenhang entspricht der Arbeitsablauf einem Transformationsprozess, in dem aus einem quantitativ, qualitativ und zeitlich definierten Einsatz der vorliegenden Potenzialfaktoren (Input) eine bestimmte Menge Produkte erzeugt (Output) werden [SCHE14]. Die zeitliche, örtliche und technologische Zuordnung von Auftrag und Arbeitsmittel bzw. Arbeitskraft zueinander ist in der Regel durch das Prinzip der Arbeitsteilung gekennzeichnet, d. h. der Zergliederung des gesamten Herstellungsprozesses eines Produktes nach technischen, technologischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Kriterien zu sinnvollen Abschnitten [KETT84]. Daraus ergibt sich der jeweilige Arbeitsablauf des Produktionssystems als Summe der erforderlichen Bearbeitungsschritte. Durch Anwendung technologischer Verfahren (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten oder Stoffeigenschaftsändern [DIN8580]) erfahren die Arbeitsgegenstände hierbei eine Wertsteigerung im Zuge der Produkterstellung (Funktionserfüllung). Die Chronologie der einzelnen Arbeitsgänge führt zur zeitlichen Struktur und damit zu der Reihenfolge, in der die durch die Systemzusammensetzung (funktionale Struktur) bereitgestellten Arbeitskräfte und Arbeitsmittel am Produktionsprozess beteiligt werden. Dies entspricht somit der zeitabhängigen Wechselwirkung zwischen technischen und personellen Ressourcen, bei der sich der Arbeitsgegenstand (Auftrag bzw. Material) quantitativ und/oder qualitativ verändert, so dass die dynamische (ablauforientierte) Aufeinanderfolge von verschiedenen Zuständen eines Systems im Fokus steht.

2.1.2 Typologie der variantenreichen Serienfertigung

Auf Basis der systemtheoretischen Grundlagen erfolgt an dieser Stelle eine Charakterisierung und Kategorisierung von Produktionssystemen mit anschließender Abgrenzung des Betrachtungsbereichs dieser Arbeit.

Da die Typologie zwar den logischen Charakter einer Klassifikation besitzt, ohne jedoch streng dem Verlangen nach Vollständigkeit und Eindeutigkeit zu genügen [SCHO80], erscheint die Wahl dieses Vorgehens zur Abbildung typischer Erscheinungsformen zweckmäßig.

Deshalb wird im nächsten Schritt ein relevanter Kriterienkatalog zur Charakterisierung von Produktionssystemen bzw. deren Variabilität herangezogen. Die Kombination spezifisch ausgeprägter Klassifizierungsmerkmale beschreibt die Rahmenbedingungen ihres Bestehens und Betriebens eindeutig.

Der Fokus der Arbeit liegt im Bereich der *variantenreichen Serienfertigung*, welche komplexe Produktionssysteme aufweisen und von einem turbulenten Umfeld geprägt sind, woraus meist ein schwankender bis sporadischer Nachfrageverlauf resultiert [LING94], [BÜDE91], [RABE80]. Dabei erfolgt keine Unterscheidung nach Branchentypen innerhalb des Betrachtungsfeldes. Die wesentlichen Kriterien und deren Ausprägungen sind in Tabelle 2-1 dargestellt, wobei die typischen Merkmale für den variantenreichen Serienfertiger dunkelgrau und mögliche Ausprägungen hellgrau hervorgehoben sind [REFA93], [LECH93], [MELLE81], [SCHO80], [RABE80].

Die **Fertigungsart** kennzeichnet das Ausmaß der Leistungswiederholung und ihre Kontinuität [AGGT90]. Bei der Serienfertigung erfolgt die gleichzeitige oder unmittelbar aufeinanderfolgende Herstellung mehrerer technologisch sowie konstruktiv ähnlicher bzw. gleichartiger Produkte. Dabei sind Jahresstückzahlen von 1.000 bis 100.000 Stück typischerweise mit Losgrößen, d. h. herzustellende Menge eines Produkts im Auftrag [SCHÖ16], zwischen 10 und 1.000 Stück üblich [EVER89]. Allerdings gestalten sich die Übergänge zwischen den Merkmalsausprägungen (Einzelanfertigung, Einzel- bzw. Wiederhol-, Serien- und Massenproduktion [AGGT90], [SCHO80], [BÜDE91]) mitunter fließend. Damit erfolgt eine Beschränkung auf die Betrachtung des *Mehrproduktfalls*, d. h. die Herstellung der Fertigungsaufträge erfolgt diskontinuierlich mit produktspezifischen, über alle Arbeitsschritte hinweg konstanten Losgrößen. Dabei entspricht der Umfang des jeweiligen Fertigungsauftrages der jeweiligen Größe des Loses.

Der Grad der Standardisierung der Produkte sowie der Kundeneinfluss wird durch das **Erzeugnisspektrum** beschrieben [SCHO80]. Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung besitzen meist mehrere kundenspezifische Produkttypen mit unterschiedlichen Leistungsspezifikationen [KÖHL96].

Die **Erzeugnisstruktur** beschreibt den konstruktiven Aufbau der Produkte unter Berücksichtigung der Anzahl an Strukturstufen und der Anzahl der Stücklistenpositionen [SCHO80]. Dabei erfolgt in der Serienfertigung die Herstellung mehrteiliger Produkte mit einfachen oder zumeist komplexen Strukturen [LING94], [BÜDE91].

Tabelle 2-1: Betriebstypologie der variantenreichen Serienfertigung

Merkmal	Ausprägungen					
	Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation		typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	
Erzeugnisstruktur	einteilige Erzeugnisse			mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur		mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur
Auftragsauslöseart	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen			Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen		Produktion auf Lager
Dispositionsart	kundenauftragsorientiert	überwiegend kundenauftragsorientiert		überwiegend programmorientiert		programmorientiert verbrauchsorientiert
Beschaffungsart	Fremdbezug unbedeutend			Fremdbezug in größerem Umfang		weitestgehend Fremdbezug
Produktionstiefe	Produktion mit geringer Tiefe			Produktion mit mittlerer Tiefe		Produktion mit großer Tiefe
Kostenstruktur	anlagenkostenintensiv			stoffkostenintensiv		arbeitskostenintensiv
Organisationstyp	Werkbank (Einzelplatz)	Baustellenproduktion	Werkstatt (Netz)	Gruppenproduktion	Reihe (Linie)	Fließproduktion

Die **Auftragsauslöseart** charakterisiert die Kopplung der Produktion an den Absatzmarkt [SCHO80]. Dabei wird zwischen der Produktion auf Basis von Einzelaufträgen oder längerfristigen Rahmenaufträgen unterschieden. Eine vollständige Entkopplung der Kundenaufträge von der Veranlassung der Herstellprozesse erfolgt bei der Produktion auf Lager, welche maßgeblich auf Absatzprognosen basiert [LING94]. Im Rahmen der variantenreichen Serienfertigung kommen alle drei Ausprägungsformen vor.

Allerdings überwiegen Kundenbestellungen in Form von Einzelaufträgen [PFOH97]. Auf eine Produktion auf Lager wird lediglich dann zurückgegriffen, wenn die Reaktions- und Durchlaufzeiten eine termingerechte Fertigstellung von Kundenaufträgen verhindern [TREU90].

Eng mit diesem Merkmal verbunden ist die **Dispositionsart**, welche Aufschluss über den Umfang des kundenauftragsorientiert ausgelösten Materialbedarfs gibt [LING94]. Das verwendete Kriterium zur Differenzierung ist das mengenmäßige Verhältnis von kundenauftragsorientierter zu programmorientierter Disposition. Zusätzlich existiert noch die verbrauchsgesteuerte Auslösung des Materialbedarfs [SCHÖ16]. Weil es sich bei der Serienfertigung meist um Standarderzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten und hohem Gleichteilanteil handelt, wird überwiegend programmorientiert auf Basis von Prognosen disponiert [SCHÖ16]. Bei bestimmten Produktvarianten mit hoher Kundenspezifität ist auch eine nachfrageorientierte Disposition denkbar [KÖHL96], [SCHO80].

Die **Beschaffungsart** charakterisiert den Umfang des Einsatzes von fremdbezogenen Materialien [SCHO80]. In diesem Zusammenhang definiert die **Produktionstiefe** die Anzahl der Produktionsstufen und aufeinanderfolgender Arbeitsvorgänge im Produktionsprozess [SCHO80]. Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung weisen in der Regel eine sehr große Produktionstiefe auf, wodurch typischerweise lediglich Normteile fremdbezogen werden [PFOH97].

Die Kapital- bzw. **Kostenstruktur** definiert den vorwiegend eingesetzten Produktionsfaktor [LECH93], [MELLE81]. Der Produktionsbegriff umfasst sowohl die Teilefertigung als auch die Montage. Auf Grund der arbeitsmittelintensiven Herstellprozesse und dem dadurch gebundenen Kapital für Anlagen und Betriebsmittel liegt der Schwerpunkt in der Fertigung auf dem Maschinenstundensatz (Arbeitsmittelkosten). Dagegen dominiert in der Montage der Mitarbeiterstundensatz (Personalkosten). Diese Arbeit bezieht sich auf die Erzeugung von Stückgütern im Rahmen der Teilefertigung.

Der **Organisationstyp** bzw. die Ablaufart oder Fertigungsform subsummiert maßgeblich die räumliche Anordnung und organisatorische Verbindung einzelner Arbeitssysteme [REFA93]. Diesbezüglich beweist die variantenreiche Serienfertigung eine große Bandbreite, die von der Werkstatt- über die Gruppen- bis hin zur Reihenfertigung reicht. Folglich kann die Ausrichtung sowohl verrichtungs- (Werkstatt) als auch gegenstandsorientiert (Reihe) ausfallen [SCHM95]. Die vielschichtige Produktionsumgebung impliziert zudem mitunter *heterogene Produktionsstrukturen*, d. h. eine gewachsene Vielfalt organisatorischer Fertigungsformen [ANSO07].

Neben dieser produktionssystemischen Einordnung werden vorrangig bestehende Strukturen betrachtet. In diesem Sinne liegt der Schwerpunkt auf dem *Betreiben eines örtlich abgegrenzten Produktionssystems* (**Abgrenzung**: kein Produktionsnetzwerk). Zudem wird von einem bedarfsgerechten Teilesortiment ausgegangen, so dass weder Aspekte der Produktentwicklung noch Innovationsprozesse oder absatzpolitische Maßnahmen Beachtung finden. Daher wird weiterhin angenommen, dass alle produzierten Güter auch verkauft werden.

2.2 Aspekte der Planung und des Betriebens von Produktionssystemen

In diesem Abschnitt wird auf den Planungs- und Betriebszyklus von Produktionssystemen dahingehend eingegangen (Abbildung 2-4), dass zum einen die zugrundeliegenden methodischen Ansätze verdeutlicht werden und zum anderen die Konfigurationsparameter der entstehenden bzw. genutzten Struktur eine Systematisierung erfahren. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, bieten die Ausführungen einen Überblick über wesentliche Aspekte der Auslegung und des Betriebens von Produktionssystemen.

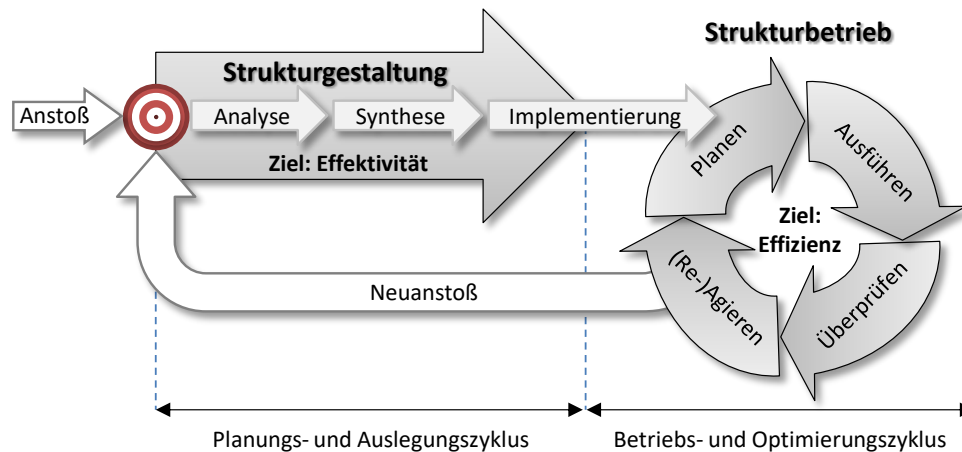


Abbildung 2-4: Dichotomie von Strukturgestaltung und -betrieb (vgl. [WEST99])

Im Planungsstadium geht es um die Generierung funktionsfähiger und zweckmäßiger Strukturen für Produktionssysteme. Eine geeignete Konfiguration ist notwendige Bedingung für den Erfolg einer Unternehmung [OERT09]. Die Effektivität einer Produktionsstruktur zeigt sich anhand der Quantität und Güte (Produktqualität) des Outputs des späteren Leistungserstellungsprozesses [SCHM01], [WINK07]. Die Gewährleistung einer definierten Produktionsleistung sowie Qualitätsrate und damit die Bereitstellung einer festgelegten Guttemenge pro Zeitraum (Durchsatz) bilden diesbezüglich die unternehmerischen Zielgrößen [RISS02], [WINK07], [WEST99]. Folglich geht es hierbei um die Generierung einer Produktionsstruktur mit dem notwendigen Potenzial.

Während des anschließenden Fabrikbetriebs rückt die Effizienz, d. h. ein bestimmtes Kosten-Nutzen-Verhältnis im Sinne eines Wirkungsgrades, der Produktionsprozesse (Formalziele) in den Fokus der betrieblichen Bemühungen [GLAD01]. Ziel ist dabei der Abruf des vorhandenen Potenzials zur Erfüllung der geplanten Funktion unter minimaler Verwendung betrieblicher Ressourcen sowie des Faktors Zeit [OERT09]. Dies entspricht der Minimierung des Aufwandes der Produkterstellung (Kosten) bei gleichbleibender Quantität und Qualität des Outputs (Leistung). In der Praxis haben sich unterschiedliche Effizienzgrößen etabliert. Liegt der Schwerpunkt auf der monetären Betrachtung anhand wertmäßiger Kennzahlen, handelt es sich um die Wirtschaftlichkeit bzw. Rentabilität [PLIN02]. Bei mengenbezogener Sicht ergibt sich die Produktivität als Maßzahl für die Effizienz eines Produktionssystems [GLÖC16]. Die Optimierung bestehender Produktionssysteme erfolgt in der Regel im Rahmen einer kontinuierlichen Verbesserung.

2.2.1 Planung und Auslegung von Produktionssystemen

Die Planung von Produktionsstätten und deren Strukturebenen ist ein komplexer und iterativ verlaufender Vorgang. Die Fabrikplanung ist die gedankliche Vorwegnahme und Festlegung zeitlich später stattfindender Aktivitäten und zu realisierender Lösungen [WIEN99], [WÖHE13]. Sie befasst sich mit der Planung und Auslegung von Fabriken bzw. Produktionssystemen und überwacht deren Realisierung und Inbetriebnahme. Wesentliche Planungsfelder der Fabrikplanung sind die Bestimmung des Standorts (Standortplanung), die Gebäudewahl (Generalbebauungsplanung) und die Fabrikstrukturplanung [GRUN12]. Planungsanstöße ergeben sich aus den grundlegenden Fällen des Neubaus, der Neu- und Umgestaltung, der Erweiterung sowie des Rückbaus und der Revitalisierung von Fabriken und Produktionssystemen [AGGT90].

Die methodischen Ansätze zur Bewältigung einer bestimmten Planungsaufgabe finden sich in definierten Aktivitäten, die grundlegende Tätigkeiten innerhalb der einzelnen Planungsphasen darstellen [AGGT90]. Mit fortschreitender Planung nimmt die Detaillierung und Verdichtung der Informationen

und Ergebnisse von der Ideal- über die Real- bis hin zur Feinplanung zu, was bis zum jeweiligen Grad der Konkretisierung und Zielerreichung mitunter ein mehrmaliges Durchlaufen der Planungsaktivitäten erfordert [SCHM95]. Die Kernaktivitäten der Planung stellen die Analyse/Konzipierung, die Synthese und die Gestaltung (inkl. Implementierung) dar. Im Fall des Neubaus und der Erweiterung von Produktionsstätten wird von Fabrikplanung im weiteren Sinn gesprochen. Die Neu- und Umgestaltung sowie der Rückbau und die Revitalisierung von Fabriken bzw. Produktionssystemen werden als Fabrikplanung im engeren Sinne bezeichnet. Dabei nimmt die Fabrikstrukturplanung eine zentrale Bedeutung ein. Die Systembildung und Strukturfindung erfolgt maßgeblich durch die Aktivitäten der Synthese: Funktionsbestimmung, Dimensionierung und Strukturierung [SCHM95]. Dabei werden technisch, organisatorisch und ökonomisch funktionsfähige Struktureinheiten generiert [WOIT77].

Die **Analyse**aufgabe setzt sich grundlegend aus dem Ziel und dem eigentlichen Objekt der Betrachtung zusammen. Ausgehend von der Definition der Zielstellung, der Aufgabenstellung sowie der Rahmenbedingungen des Planungsprojektes wird im Zuge der Analyse die Informationsbasis der gesamten Planung erstellt. Die Qualität und Intensität, die in diese Arbeit einfließen, bestimmen maßgeblich den Inhalt, die Ergebnisse sowie den Aufwand in der weiteren Vorgehensweise. Die Analyse stellt in jeder Planung eine elementare und über alle Planungsphasen einzusetzende Aktivität dar, wobei der jeweilige Umfang in Abhängigkeit vom Fortschritt der Planung sehr unterschiedlich ausfallen kann.

Die analytische Grundrichtung wird durch die **betriebliche Zielstellung** bestimmt. In der Analyse- und Konzeptionierungsphase erfolgt bereits die planerische Vorwegnahme des Betriebszyklus' eines Produktionssystems (vgl. [WÖHE13]) mit dem Ziel, eine definierte Ausbringungsmenge pro Periode (Durchsatz) zu gewährleisten. Elementarer Ausgangspunkt der Analyse ist daher das erwartete durchschnittliche **Produktionsprogramm**, welches die grundlegende Festlegung der Aufgaben bzw. Leistungsanforderungen der Produktion hinsichtlich:

- sachlicher (Art, Größe, Qualität),
- mengenmäßiger (Stückzahl, Menge, Volumen),
- wertmäßiger (Preis, Kosten) und
- zeitlicher (Produktionszeitraum, Termine) Aspekte darstellt [SCHE14].

Weiterer Betrachtungsgegenstand sind die Produktionsfaktoren [KETT84]:

- Mitarbeiter (Anzahl, Qualifikation, Belastungen, Einsatzdauer),
- Arbeits-/Betriebsmittel (Anzahl, Art, Leistung, Zustand, Auslastung, Wirkungsgrad, Verfügbarkeit),
- Werkstoffe bzw. Materialien (Verbrauch, Versorgungssicherheit, Entsorgung, Ausschuss),
- Energie (Verbrauch, Versorgungssicherheit, Umweltbelastung) und
- Kosten (Personal, Material, Betriebsmittel, Energie, Raum, Instandhaltung, Umsatz, Gewinn).

Die analytische Zerlegung des zu betrachtenden Systems in seine Elemente, Prozesse und Relationen wird anhand dieser Schwerpunkte konkretisiert [SCHM95]. Aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse werden in der Konzipierung aufgestellte Varianten miteinander verglichen und das Konzept der weiteren Ausplanung ausgewählt. Voraussetzungen für einen Vergleich und eine Auswahl bilden Bewertungskriterien sowie Kalkulationsgrößen [KOET01]. Dabei sind die Ergebnisse der Konzipierung insbesondere durch die Erfahrung und das Wissen des Planers geprägt [SCHM95]. Die Entwicklung von Strukturkonzepten ist die kreativ anspruchsvollste Aktivität der Planung.

Die im Zuge der **Synthese** generierte Startstruktur beinhaltet alle wesentlichen Funktionen der Fabrikabläufe. Die Aufgabe der Mitarbeiter in den operativen Bereichen ist es dann, diese Struktur den sich ändernden Anforderungen anzupassen und somit eine Nachsteuerung des Fabrikbetriebs an die zunehmende Dynamik der Umwelt zu ermöglichen. Die Aktivität der Strukturierung bestimmt maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des zukünftigen Fabrikbetriebs, welche als betriebliches Grundziel gilt [VDI3633], [JAIN93]. Die Synthese basiert auf den Planungsvorgaben, die aus den Unternehmenszielen

abgeleitet werden, den im Rahmen der Analyse erhobenen Randbedingungen und den produktbezogenen Informationen über die erforderlichen technologischen Prozesse und Arbeitsmittel. In diesem Zusammenhang werden Struktureinheiten gebildet, dimensioniert, vernetzt und anschließend angeordnet [EVER99], [RIET01].

Die Bildung organisatorischer Leistungseinheiten erfolgt durch die **Funktionsbestimmung**. Zunächst werden dazu die Art notwendiger Arbeitsmittel bzw. Fertigungstechnologien sowie deren Prozesszusammenhänge zur Herstellung eines definierten Produktprogramms ermittelt. Dafür ist die in der Stückliste definierte Erzeugnisstruktur von den Rohmaterialien über Einzelteile und Baugruppen bis hin zum Endprodukt zu analysieren. Die Zusammenfassung der einzelnen Produktionsablaufschritte zu Struktur-/Leistungseinheiten erfolgt auf Basis dieser (vorrangig qualitativen) inhaltlichen Bestimmung der Arbeitsschritte und deren funktioneller Verknüpfung zur Bildung von Arbeitsvorgangsfolgen. Ausgangspunkt der Strukturbildung ist die Festlegung, welches Produkt in welcher Organisationseinheit hergestellt wird. Somit definiert sie implizit die organisatorische (produktionssystembezogene) Arbeitsteilung, im Sinne der Art- und Mengenteilung der gesamten Produktionsstätte. Die Bildung von Struktureinheiten erfolgt dabei durch gezielte Anwendung spezifischer Optimierungsgesichtspunkte verschiedener Prinzipien sowie deren Kombination (vgl. [RIET01]). Jedoch vermittelt eine Prüfung relevanter Bildungskriterien bzw. -aspekte lediglich Anhaltspunkte für die spätere Gestaltung.

Anschließend erfolgt die kapazitive, stoffliche und flächenmäßige **Dimensionierung** der Elemente der einzelnen Organisationseinheiten. Sie umfasst die quantitative Bestimmung (Anzahl, Abmessungen) der Arbeitsmittel (inkl. VWP sowie Lager- und Transporttechnik), Arbeitskräfte und Flächen [WIEN99]. Dabei ist zum einen die räumliche Ausdehnung der Struktureinheiten auf Basis des zur Erfüllung des vorgegebenen Produktionsprogramms erforderlichen Kapazitätsbedarfs zu bestimmen. Andererseits sind Flächen und Einrichtungen zu dimensionieren, die das Zusammenspiel der einzelnen Organisationsbereiche regeln und deren Integration in eine anforderungsgerechte Prozessstruktur gewährleisten. Zur Ableitung der Materialflussbeziehungen werden die Arbeitspläne für die einzelnen Produkte näher untersucht. Die Relationen im Sinne der durch ein Produkt belegten Arbeitsmittel visualisieren Arbeitsablaufschema [GRUN12].

Während der **Strukturierung** im engeren Sinne erfolgt die funktionsgerechte, technisch-organisatorisch und betriebswirtschaftlich günstige Vernetzung und Anordnung der Elemente eines Produktionssystems zur Sicherstellung seiner Gesamtfunktion [KETT84]. Dieser planerische Vorgang geht folglich zwangsläufig mit der Bildung von zweckmäßigen Struktur-, Leistungs- bzw. Organisationseinheiten einher [GRUN12], [HARM03], [ARNO03], [EVER99], [FÖRS83]. Die optimale Anordnung der Systemelemente innerhalb der organisatorischen Einheiten erfolgt in Abhängigkeit von der Anzahl, Richtung und Intensität ihrer betrieblichen Relationen (Beziehungen).

Die Synthese einer geeigneten räumlich-zeitlichen Relationsmenge fokussiert auf die Bereitstellung eines funktionsfähigen Produktionssystems und somit des Potenzials zur Erreichung der Leistungsziele. Somit hängt die Effektivität eines Produktionssystems maßgeblich von der Leistungsfähigkeit seiner Elemente und deren dynamischer Vernetzung ab [WEST16].

Durch die nachfolgende **Gestaltung** werden die entwickelten idealen Strukturkonzepte im Wesentlichen an die bestehenden Flächen- und Raumrestriktionen angepasst und in einen realisierbaren Systementwurf überführt [GRUN12]. Insofern erfolgt die Umsetzung der planerischen in manifeste Strukturen. Jede konkrete Produktionsstruktur lässt sich einem bestimmten räumlichen, zeitlichen und funktionalen Strukturtyp zuordnen, welcher jeweils eine strukturelle Grundgestalt widerspiegelt und somit gemeinsame Ordnungskriterien verkörpert [SCHM70]. Ein Typ bezeichnet daher einen Stellvertreter aller Strukturen, die nach dem gleichen Grundsatz oder Prinzip aufgebaut bzw. geordnet sind.

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Gestaltungsansätze, die die Veränderungsfähigkeit des Produktionssystems im Betrieb fördern. Zu den Basisansätzen zählen die Gruppentechnologie sowie die Fertigungssegmentierung (Modulare Fabrik). Letzterer verfolgt eine ganzheitliche Strategie bei Bildung produktorientierter Organisationseinheiten über mehrere Stufen des Herstellungsprozesses zur gemeinsamen Verfolgung einer definierten Wettbewerbsstrategie [WILD94]. Bei der Gruppentechnologie erfolgt eine Spezialisierung auf die Besonderheiten der Teilefertigung bei arbeitsmittelintensiver Produktion. Dabei basiert die Bildung von Leistungseinheiten auf Ähnlichkeiten hinsichtlich der Konstruktion, Fertigungsanforderungen oder Fertigungsabläufe der zu produzierenden Erzeugnisse (vertiefend [MASS93], [MASS99], [RICK90], [MART89], [DEBN99], [SCHA75]).

Darüber hinaus sind praxisorientierte Ansätze wie die Fraktale Fabrik [WARN92], [KÜHN94], [WARN95], die Vitale Fabrik ([AWF96], [FUCH95]) oder die Agile Fabrik ([GOLD95], [PETT96], [KIDD94]) oder eher visionäre Konzepte wie Bionic Manufacturing Systems ([OKIN94], [UEDA96]) oder Holonic Manufacturing Systems ([WINK94]) vorhanden. Dabei ist allen gemein, dass sie versuchen, den Ansprüchen der modernen Produktion mit hoher Marktorientierung, Autonomie, Selbstoptimierung und -organisation zu begegnen. Unter dem Begriff Industrie 4.0 werden die Aspekte der zunehmenden Vernetzung (Stichwort: Internet of Things [UCKE11]), informatorischen Transparenz (Stichwort: Digitale Fabrik [VDI4499], [KÜHN06]) dezentralen Entscheidungsfindung (Stichwort: Cyber physical systems) zusammengefasst [HERM16], die durch umfassenden Informationsaustausch bzw. virtuelle Vorwegnahme von Situationen eine automatisierte Entscheidungsfindung und Selbstorganisation unterstützen sollen [ABEL11].

Im Zuge der Gestaltung erfolgt die **Implementierung** der Strukturkonzepte. Infolge des sukzessiven Anlaufs bzw. stückzahlorientierten Hochlaufs wird das Produktionssystem allmählich in Betrieb genommen. Dabei steht die Erreichung und Absicherung sowohl der Produkt- als auch der Prozessreife im Mittelpunkt der Bemühungen. Insofern stellen der Anlauf und das schrittweise Hochfahren der Leistung einen fließenden Übergang zum Betreiben der Produktionsstruktur dar. Endpunkt der Inbetriebnahme ist der Start-of-Production, d. h. der stabile Produktionsbetrieb mit geplantem Durchsatz.

2.2.2 Betreiben und Optimieren von Produktionssystemen

Im Betriebs- und Optimierungszyklus von Produktionssystemen rückt die zielbezogene Regelung des Wertschöpfungsprozesses in den Mittelpunkt. In diesem Zusammenhang geht es zum einen um die adäquate Einhaltung der planerischen Strukturen bzw. Abläufe und zum anderen um ihre sukzessive Anpassung an veränderte Bedingungen und Anforderungen.

Der Betrieb der Produktionsstrukturen fokussiert auf eine zuverlässige Funktionserfüllung des Produktionssystems. Dazu ist ein geeignetes Systemverhalten sicherzustellen, welches das vorhandene Potenzial der implementierten Aufbau- und Ablaufstruktur effizient abrufen.

Die Kernfunktion in dieser Phase übernimmt die Produktionsplanung und -steuerung (PPS), welche die operative Umsetzung der zeitlichen Struktur darstellt. Hierbei beziehen sich die planerischen Aktivitäten auf die Vorwegnahme von Kunden- oder Umweltveränderungen und die Generierung von Vorgaben für die Produktion. Die Produktionsprogramm-, Mengen- und Terminplanung erzeugen je nach Betrachtungs- bzw. Vorgriffhorizont iterativ immer detailliertere Vorgaben hinsichtlich der Art und Anzahl der herzustellenden Produkte sowie des gewünschten Zeitraums ihrer Fertigstellung [KIST01]. Die Grobplanung zukünftiger Prozesse beruht auf Annahmen, die aus Vergangenheitsdaten resultieren und erst in den späteren Planungsschritten bestätigt oder aktualisiert werden. Als letzter Schritt der Feinplanung erfolgt die Erzeugung von Aufträgen, in deren Zuge bei der variantenreichen Serienfertigung die Losgröße festgelegt wird [LÖDD08]. Ergebnis dessen ist die Auftragsliste, die den

konkreten Produktionsplan für die jeweilige Periode darstellt. Dadurch erzeugt die Produktionsplanung innerhalb der Fertigung und Montage ein Abbild des angestrebten Soll-Zustandes.

Erfahrungsgemäß führen unvorhergesehene Störungen (z. B. Personal- oder Maschinenausfälle) und Unwägbarkeiten (Qualitätsprobleme und Lieferverzögerungen) allerdings zwangsläufig dazu, dass die Planvorgaben nicht eingehalten werden können [WIEN97]. Folglich ist ein Eingreifen auf operativer Ebene erforderlich, um die Erreichung der betrieblichen Ziele sicherzustellen. Die Notwendigkeit für regelnde Eingriffe besteht immer dann,

- wenn Material (Aufträge, Transportlose etc.) in ein Arbeitssystem eintritt,
- wenn Material aus einem betrachteten Arbeitssystem austritt,
- wenn der Materialfluss aufgeteilt wird,
- wenn Materialflüsse zusammengeführt werden und
- wenn sich die Arbeitsgeschwindigkeit (Leistung) eines Arbeitssystems ändert [DANG97].

Dies betrifft demzufolge das Übertreten von Systemgrenzen durch den Arbeitsgegenstand, Verzweigungen des Materialflusses sowie eine ausführungs- oder störungsbezogene Änderung der systemischen Leistung. Für alle diese Fälle sind organisatorische Regelungen und Maßnahmen erforderlich, um einen reibungslosen Fabrikbetrieb im Sinne des gewünschten Systemverhaltens zu gewährleisten. Insofern repräsentiert die Auftragsliste gleichzeitig die Scharnierstelle zwischen Produktionsplanung und anschließender Regelung (Abbildung 2-5).

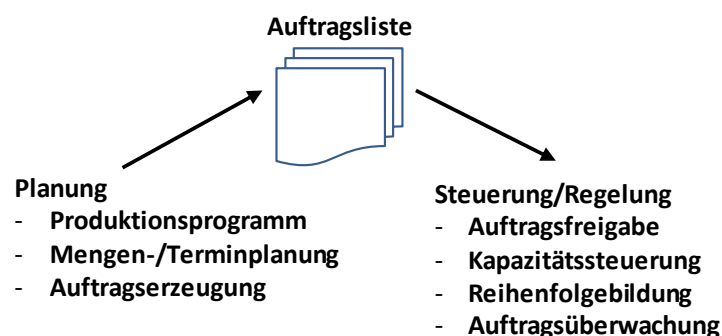


Abbildung 2-5: Auftragsliste als Scharnierstelle zwischen Planung und Steuerung (vgl. [HACK89])

In diesem Zusammenhang soll die Produktionssteuerung für die Erreichung der betrieblichen Ziele (Durchlaufzeit, Auslastung, Bestand, Termintreue) bzw. die Einhaltung des Produktionsplans durch Eingriff in die aktuell ablaufenden Produktionsprozesse sorgen. Sie beeinflusst folglich gezielt das Produktionssystem bei Abwicklung der Produktionsaufträge durch das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich des Bedarfs (Menge und Termin), der Qualität sowie der Arbeitsbedingungen [REFA90].

In diesem Kontext können die Produktionsplanung und -steuerung ebenso wie die Produktion als Teile des betrieblichen Regelkreises aufgefasst werden (Abbildung 2-6).

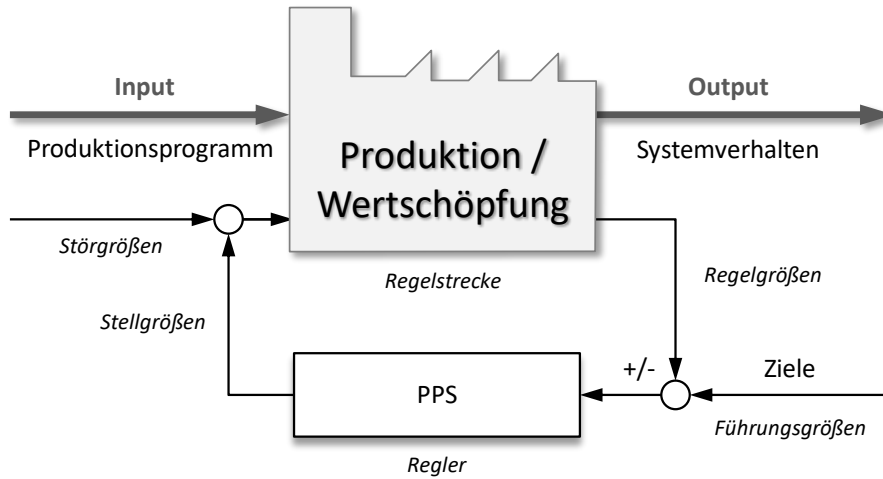


Abbildung 2-6: Die Produktion im betrieblichen Regelkreis

Die unternehmerischen Zielsetzungen (Führungsgrößen) bilden die Eingangsgrößen des Regelkreises. Im Zuge der Aktivitäten der Produktionsplanung und -steuerung (Regler) erfolgt die Verarbeitung dieser auf Basis der sich aus dem aktuellen Produktionsprogramm ergebenden Systemlast (Input) zu Vorgaben für die Produktion [MÖSS99]. Diese Informationen (Stellgrößen) werden anschließend an das Produktionssystem (Regelstrecke) übertragen. Danach erfolgt die Rückführung des betrieblichen Ergebnisses (Regelgrößen) an die Produktionsplanung und -steuerung und die Ermittlung des Erfüllungsgrades der vorgegebenen Ziele (vgl. [REUT11], [UNBE11]).

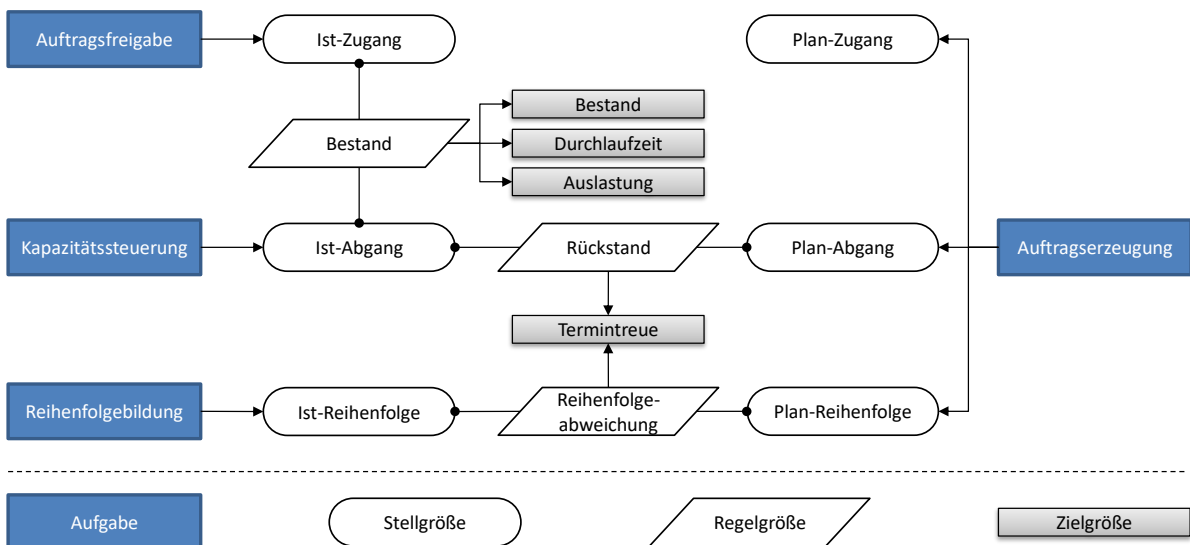


Abbildung 2-7: Konfiguration der Produktionsplanung und -steuerung [LÖDD08]

Die Daten für die Rückkopplung stammen in der Regel aus der Betriebsdaten- bzw. Maschinendatenerfassung, ergänzt um weitere relevante Informationen (Auftragsdaten, Maschinenbelegung). Dieser Vergleich zwischen geplantem und tatsächlichem Systemzustand ermöglicht eine gezielte Anpassung der Stellgröße [DIN60050]. Das Ziel der Regelung lässt sich als Einhaltung des Produktionsplanes und Kompensation einwirkender Störfaktoren zusammenfassen. Letztere umfassen sowohl einzelne technische, personelle oder organisatorische Störungen als auch ein grundsätzlich anderes Systemverhalten (Output) infolge einer geänderten Produktionsstruktur (Änderung der Regelstrecke) (vgl. [MÖSS99]).

Die einzelnen Aktivitäten der Produktionsplanung und -steuerung (Auftragserzeugung, -freigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung [LÖDD08]) dienen dazu, die Einhaltung der betrieblichen Zielstellungen zu gewährleisten (Abbildung 2-7). Sie werden an späterer Stelle im Detail erörtert (Abschnitt 3.1.2). Die Auftragsüberwachung bezieht sich auf die Rückkopplung der Regelgrößen. Daher bildet sie die Grundvoraussetzung für das Funktionieren des betrieblichen Regelkreises.

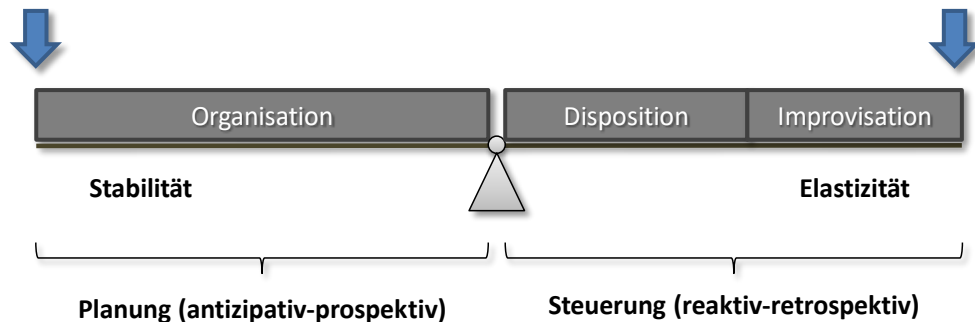


Abbildung 2-8: Balance zwischen Stabilität und Elastizität

Eine effektive Regelung wird dadurch erschwert, dass ggf. Freiheitsgrade bei der Arbeitsausführung bestehen. In diesem Kontext bezeichnet der Organisationsgrad als Anteil geregelter Abläufe (Abbildung 2-8) das organisatorische Gleichgewicht von Stabilität (Organisation) und Elastizität (Disposition und Improvisation) [GROC95]. Durch die planmäßige, dauerhafte Standardisierung regelmäßig zu wiederholender Vorgänge (Organisation) soll eine stabile Leistungserstellung gewährleistet werden [GROC95]. Bei fallweisen Regelungen (Disposition) oder Ausnahmeregelungen (Improvisation) verbleibt die Entscheidungsgewalt beim jeweiligen Akteur, so dass er hier den größten Handlungsspielraum hat, um die Sachlage zu interpretieren und situationsspezifisch zu reagieren [SCHU13], [KIRC05], [ULRI01]. Demzufolge kann es zu technologisch oder organisatorisch bedingten Störungen (z. B. auf Grund falscher Fertigungsparameter oder mangelnder Absprachen) oder mitarbeiterinduzierten Planabweichungen kommen, die jeweils in einer mangelnden Realisierung des beabsichtigten Systemverhaltens und somit der Verfehlung der betrieblichen Zielstellungen münden.

Die Ansätze aus dem Lean Manufacturing bzw. Toyota-Produktionssystem fokussieren bisweilen auf reaktive Verbesserungen der Produktionsprozesse und die Erhöhung ihrer Effizienz durch die Anwendung bestimmter Analysemethoden und die Generierung von Standards [KÖTT16], [OHNO09]. Dies dient vor allem der Erhöhung der (organisatorischen) Stabilität der Prozessabläufe. In diesem Sinne wird im Rahmen dieser Arbeit die Zuverlässigkeit der Arbeitsausführung bzw. Funktionserfüllung als notwendige Bedingung angenommen und damit vorausgesetzt (**Abgrenzung:** keine unzulässigen Abweichungen auf Grund der Freiheitsgrade der Akteure, vgl. [KÖTT16]). Die sukzessive Standardisierung von Vorgehensweisen birgt allerdings die Gefahr der Pfadabhängigkeit in sich (vgl. „path dependency“ [CORD13]), die dazu führt, dass signifikante Verbesserungspotenziale nicht mehr erkannt und wahrgenommen werden können.

Ziel des Fabrikbetriebs ist es, unter bestmöglicher Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten (Potenzial der Produktionsstruktur) bei zugleich kurzer Durchlaufzeit die Herstellkosten der gefertigten Produkte zu minimieren [KETT84], um so das wirtschaftliche Fortbestehen des Unternehmens zu sichern. Diese teilweise konkurrierenden Zielstellungen werden als Polylemma der Ablaufplanung bezeichnet [LÖDD08]. Hierbei stehen sich zum einen die Ressourcensicht, die durch Auslastungsmaximierung und Bestandsminimierung die Kosten begrenzen soll, und zum anderen die Auftragsicht, die darauf ab-

zielt, mittels Termintreuemaximierung und Durchlaufzeitminimierung die angebotene Leistung zu erhöhen, disparat gegenüber. In der Betriebsphase ist die Produktionsregelung somit bestrebt, das bestmögliche Kosten-Leistungsverhältnis zu ermöglichen.

Neben dieser Effizienz als zentralem Ziel der Produktion ist seit mehreren Jahren auch der Trend hin zur Flexibilisierung und erhöhter Veränderungsfähigkeit der Fabrikelemente zu beobachten (z. B. [HERN02], [FÖRS99], [HART95]), um den wechselnden Anforderungen des Unternehmensumfeldes gerecht zu werden. Des Weiteren stellt die Zuverlässigkeit der betrieblichen Leistungserstellung ein maßgebliches Kriterium dar. In diesem Zusammenhang wird eine Vermeidung bzw. Reduktion jedweder Störung des definierten Transformationsprozesses angestrebt.

2.3 Veränderungs- und Anpassungsbedarf von Produktionssystemen

Die ständige Forderung nach Veränderung der Konfiguration von Produktionssystemen entspringt aus der Vielzahl unterschiedlicher auf sie einwirkender umweltinduzierter sowie systeminhärenter Einflussgrößen. Auf Grund der erhöhten Kundenorientierung und des breiten Produktspektrums stellt das volatile Umfeld die größte Herausforderung moderner Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung dar.

Diesbezüglich besitzt die induzierte **Variabilität** einen dichotomen Charakter, den Abbildung 2-9 veranschaulicht (vgl. [VASI05]). Auf der einen Seite betrifft dies die **Turbulenz** infolge nicht beeinflussbarer **Fluktuationen** relevanter Parameter des Produktionsumfelds (vgl. [KIEN11], [WIEN02], [JODL08]). Auf der anderen Seite besteht der beeinflussbare und damit planbare Anteil in der **Variation** der betrieblichen Regelungsgrößen, die die **Komplexität** der Produktionssteuerung ausmachen ([MAIN08], [BORN09], [ELMA09], [JODL08]).

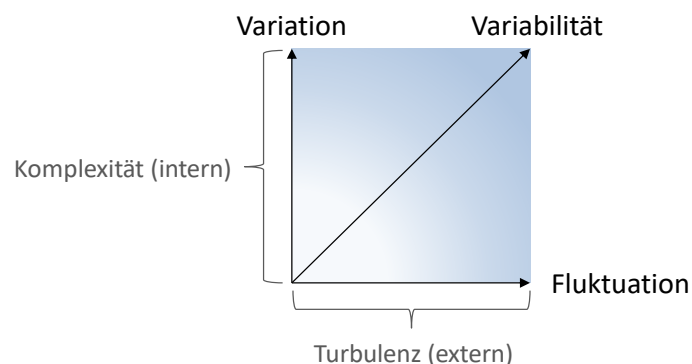


Abbildung 2-9: Zusammenhang von Variation, Fluktuation und Variabilität

Turbulenz subsummiert die Auswirkungen der immanenten Ungewissheit der Kundennachfrage auf die Planungsaktivitäten. Als Resultat weist das zu realisierende Produktionsprogramm auf Grund von Unsicherheiten einen schwankenden Bedarf und wegen der Dynamik der Marktnachfrage eine wechselnde Produktzusammensetzung auf und beinhaltet damit variierende Belastungssituationen für das Produktionssystem [HALL99]. Diese Effekte verstärken sich in ihrem Zusammenwirken und üben letztlich auf allen betrieblichen Ebenen einen Veränderungsdruck aus [WIEN05].

Als Systemeigenschaft resultiert die Komplexität aus der Vielzahl und Varietät interdependenter Elemente, der Zahl und Verschiedenartigkeit ihrer Relationen sowie der zeitlichen Veränderung der Betrachtungsobjekte und/oder ihrer Beziehungen [ZEUG98]. Dies betrifft im betriebsorganisatorischen Kontext die Kompliziertheit der Produktionsregelung, d. h. die Vielzahl und Vielfalt der durch die Steuerung beeinflussbaren Parameter und Vorgänge in ihrer Wirkung auf die zeitliche Variabilität des Pro-

duktionsprozesses [KIEN11], [LOHS02], [ULRI88]. Diesbezüglich erhöhen stochastische Ressourceneigenschaften (z. B. Störungen, Leistungsschwankungen) die Unsicherheit, während technisch-technologische Veränderungen (z. B. Betriebsmitteloptimierung, Lebenszyklus, Verschleiß) die Dynamik des Systemverhaltens zusätzlich steigern [HALL99]. Ungewollte Abweichungen vom Produktionsplan beziehen sich dabei auf alle organisatorischen (Prognosefehler, fehlerhaftes/falsches Material, Lieferverzug, fehlerhafte Arbeitsunterlagen), personellen oder technischen Störungen (Ausfall/Beeinträchtigung von Arbeitssystemen oder Arbeitskräften), die den Leistungserstellungsprozess beeinträchtigen [WIEN06], [MÖSS99].

Weiterhin können Anpassungsbedarfe eines Produktionssystems durchaus durch willentliche Entscheidungen in Form des beabsichtigten Wechsels der Unternehmensstrategie (z. B. Änderung des betrieblichen Zielsystems) induziert werden [MÖSS99], [CORR96], [HALL99].

Insbesondere die unvorhergesehenen Veränderungsimpulse lassen sich hinsichtlich folgender Dimensionen differenzieren [CORR96]:

- Neuartigkeit,
- Häufigkeit bzw. Frequenz,
- Sicherheit bzw. Ungewissheit,
- Geschwindigkeit und
- Ausmaß der Änderung.

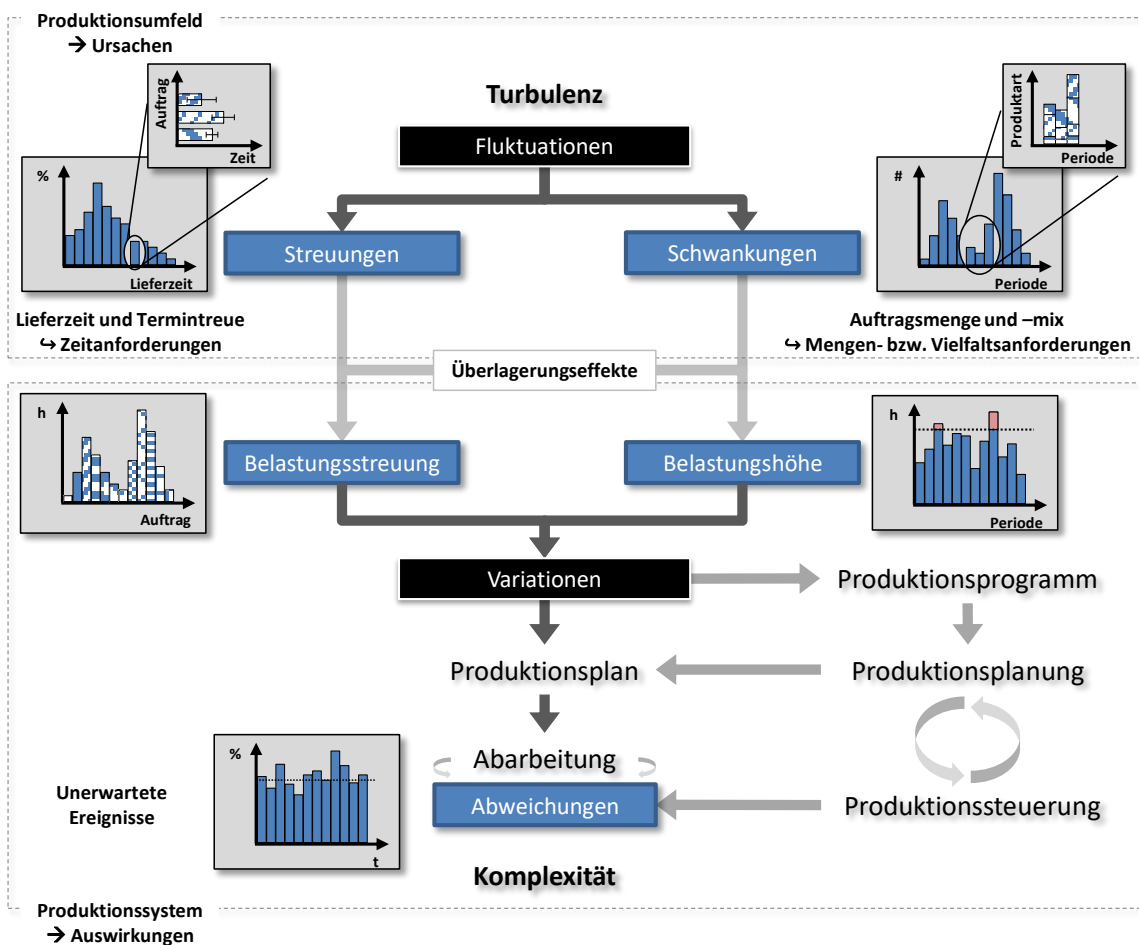


Abbildung 2-10: Entstehen von Veränderungs- und Anpassungsbedarfen

Dementsprechend sind die turbulenzinduzierten Veränderungsbedarfe starken Fluktuationen unterworfen und ziehen in der Regel Variationen der Fertigungsaufgabe bzw. des Produktionsprogramms nach sich [WORB03]. Aus dem permanenten Wechsel der Anforderungen, die an die variantenreiche Serienfertigung gestellt werden, ergibt sich die Volatilität der Auftragsbearbeitung (Abbildung 2-10), auf die im Folgenden eingegangen wird.

2.3.1 Turbulenz des Unternehmensumfelds

Die Turbulenz des Produktionsumfeldes lässt sich maßgeblich durch zwei produkt- bzw. auftragsspezifische Aspekte der Fluktuation charakterisieren [KIEN11], [WIEN06], [WIEN02]:

- Heterogene Zeitanforderungen ergeben sich aus Streuungen der auftragsspezifischen Lieferzeit und Termintreue.
- Heterogene Mengen- (Mengenmix) bzw. Vielfaltsanforderungen (Produktmix) resultieren aus Schwankungen der periodenbezogenen Auftragsmengen und -zusammensetzung.

Hinzu kommt der Effekt einer beschleunigten Frequenz des Produktwechsels und damit der spezifischen Anforderungen (variierender Zeitraum der gestellten Leistungsanforderungen), d. h. Änderung der Zeitspanne der generellen Nachfrage eines Produktes. Produktspezifische Bedarfsfrequenzen beziehen sich auf immer kurzzyklischer werdende Veränderungen der Randbedingungen der Produktion infolge veränderter Produkt- oder Technologielebenszyklen [POHL14]. Variierende Anforderungen eines Produkts im Zeitverlauf (Mengen- oder Leistungsanforderung je Betrachtungsintervall) betreffen die Änderung der Absolutwerte sowie der Streuung des Bedarfs. Periodisch divergierende Leistungsanforderungen können aus saisonal, konjunkturell oder strukturell schwankenden Bedarfssituationen resultieren [LING94].

Durch die Überlagerung der Vielzahl verschiedenartiger Leistungsanforderungen auf Auftragsebene ergeben sich kontinuierlich Variationen bzw. Streuungen der Gesamtproduktionsaufgabe, die maßgeblich bedingt werden durch variierende:

- produktbezogene Arbeitsfolgen und Bearbeitungszeiten,
- Auftragsmengen und/oder
- Kundenforderungen hinsichtlich einzelner Auftragspezifikationen (z. B. Lieferzeiten).

All diese *Fluktuationen* des Produktionsumfeldes stellen die Turbulenz dar [KIEN11], die insbesondere über statistische Belastungstreuungen im Zeitverlauf sowie die spezifische Belastung je Planungsperiode das konkrete Produktionsprogramm sowie dessen Variationen definiert (Abbildung 2-10). Die resultierenden Auswirkungen auf das Produktionssystem betreffen vor allem die Aktivitäten der Produktionsplanung [KIEN11], [WIEN06], [VASI05], da die im periodenbezogenen Produktionsplan repräsentierten wechselnden Anforderungsbündel direkt damit einhergehen, ein Produktionssystem detaillierter mit seinen vielschichtigen Wechselwirkungen betrachten zu müssen. Dies trägt zur Komplexität der Problemstellung bei und erschwert damit die Planbarkeit des Systems.

Die Änderungen des Produktionsprogramms (Variationen) lassen somit sich qualitativ über die Homogenität bzw. Heterogenität der Produktpalette charakterisieren. Die entsprechende Produktvielfalt, d. h. die Anzahl unterschiedlicher Produktarten, spiegelt die *Varianz (Produktmix)* wider. Quantitative Aspekte sind zum einen die *Auftragsmenge*, d. h. die Produktanzahl im Betrachtungszeitraum (**Produktionsvolumen**), und zum anderen die *zeitliche Verteilung der Auftragsfolge*, die den **Bedarfsverlauf** repräsentiert [KOB00], [AGGT90], [SCHU78]. Die aus dem Produktionsprogramm abgeleiteten wesentlichen Leistungsanforderungen an das Produktionssystem charakterisieren die resultierende Produktionsaufgabe.

Bei ereignisorientierter Betrachtung der auftretenden Variationen rücken das Produktionsvolumen (Gesamtbelastung des Produktionssystems) sowie die Auftragszusammensetzung (Produktmix im Sinne der Variantenzahl) in den Mittelpunkt.

Aufbauend auf der möglichen Fluktuation des Bedarfs auf Ebene der einzelnen Produktarten (vgl. stückzahlbezogene Grundfälle von Produktionsprogrammänderungen [WOIT76]) fasst Tabelle 2-2 die summarischen Auswirkungen für das Produktionssystem hinsichtlich:

- des Gesamtproduktionsvolumens $\sum n_j$ sowie
- der Variantenanzahl l bzw. m
- für die Zeitpunkte t_i bzw. t_{i+1} zusammen.

Tabelle 2-2: Fälle der Veränderung des Produktionsprogramms

Fall		Nr.	Tendenz	
Produktionsvolumen	Variantenzahl			
$\sum_{j=1}^{j=l} n_j(t_i) < \sum_{j=1}^{j=m} n_j(t_{i+1})$	$l = m$	1	Produktionsvolumen steigt	
	$l \neq m$	$l < m$		2
		$l > m$		3
$\sum_{j=1}^{j=l} n_j(t_i) > \sum_{j=1}^{j=m} n_j(t_{i+1})$	$l = m$	4	Produktionsvolumen sinkt	
	$l \neq m$	$l < m$		5
		$l > m$		6
$\sum_{j=1}^{j=l} n_j(t_i) \approx \sum_{j=1}^{j=m} n_j(t_{i+1})$	$l = m$	7	Produktionsvolumen bleibt annähernd gleich	
	$l \neq m$	$l < m$		8
		$l > m$		9
$\sum_{j=1}^{j=l} n_j(t_i) > 0 \wedge \sum_{i=1}^{i=m} n_j(t_{i+1}) = 0$	$l > 0 \wedge m = 0$	10	Einstellen der Produktion	
$\sum_{j=1}^{j=l} n_j(t_i) = 0 \wedge \sum_{j=1}^{j=m} n_j(t_{i+1}) > 0$	$l = 0 \wedge m > 0$	11	Anlauf der Produktion	

Die Verschiebung im Produktionsprogramm kann im Hinzukommen bzw. Wegfall einzelner Produktarten (Änderung der Variantenzahl), der Änderung der Nachfragemenge je Produktart pro Periode (produktbezogene Auftragsmengen) oder einer Kombination aus beiden bestehen. Daraus kann wiederum eine proportionale (unter Beibehalten des Produktmixes) oder disproportionale (bei verändertem Produktmix) Erhöhung oder Reduktion des aggregierten Produktionsvolumens resultieren. Ob die Veränderungen der Auftragszusammensetzung Auswirkungen auf das Produktionsvolumen haben, hängt vom Einzelfall ab.

An- und Auslauf einer Produktion werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da die Beurteilung einer bestehenden Struktur für diese Fälle (10 und 11) nicht sinnvoll erscheint. Weiterhin ist eine Veränderung des Produktmixes zumeist mit einer entsprechenden Erhöhung oder Verminderung des Ge-

samtproduktionsvolumens verbunden. Die Szenarien 8 und 9 werden daher als Sonderfälle mit geringer Relevanz angesehen. Darüber hinaus bezieht sich der Fall 7 (gleichbleibendes Produktionsvolumen bei gleicher Variantenzahl) auf ein weitestgehend unverändertes Produktionsprogramm, obwohl die Konstanz des Produktionsvolumens auch durch kompensatorische Effekte von Stückzahlveränderungen der einzelnen Produktvarianten herrühren kann. Speziell die Fälle 2 (steigendes Produktionsvolumen bei steigender Variantenzahl) und 6 (sinkendes Produktionsvolumen bei sinkender Variantenzahl) sind hingegen von praktischer Bedeutung.

2.3.2 Komplexität von Produktionssystemen

Die Turbulenz des Produktionsumfeldes mit seinen Fluktuationen in Form von Streuungen und Schwankungen steigert durch die Verschiedenartigkeit der Leistungsanforderungen und ihrer Veränderung im Zeitverlauf die Variabilität und erhöht infolgedessen die Anforderungen an eine vorausschauende Planung [WIEN02], da sie zwangsläufig eine Variation des Produktionsprogramms nach sich zieht. Dies erhöht die Komplexität des Produktionssystems und seiner Strukturen [REIT03], woraus wiederum nichtlineare Effekte resultieren. Die Nichtlinearität der Wechselwirkungen innerhalb des Leistungserstellungsprozesses führt insgesamt zu einem komplexen Verhalten (Abbildung 2-10).

Obwohl Belastungssituation und Leistungsfähigkeit des Systems langfristig im Gleichgewicht stehen sollten [NYHU12], verliert diese Feststellung wegen der extern induzierten Variation der Produktionsaufgabe und störungsbedingter Abweichungen für die mittel- bis kurzfristigen Planungs- und Steuerungsaktivitäten einzelner Aufträge jedoch an Aussagekraft [WIEN02]. Eine statische Beschreibung von Systemen auf der Basis von Durchschnittswerten ohne die Berücksichtigung ihrer Dynamik kann diesem Verhalten nicht gerecht werden, da die übliche enge Kopplung von Planung und Steuerung über Mittelwert und Streuung nicht mehr in allen Fällen funktioniert [WEST00a].

Während die Planung der Produktion periodisch und prognostisch erfolgt [WEST00a], werden Steuerungseingriffe ereignisorientiert und reaktiv vorgenommen. Bereits beim Planen des Produktionssystems an sich (Fabrik- bzw. Produktionssystemplanung) wird grundsätzlich von einer gleichmäßigen Verteilung eines statischen Produktionsprogramms ausgegangen, wobei das daraus resultierende Belastungsprofil die Grundlage der planerischen Auslegung darstellt. Während des Betriebs wird die Auftragsbearbeitung auf Basis der durchschnittlichen Bedarfssituation für die gesamte Produktion in einem mittel- bis langfristigen Zeitraum geplant (makroskopische Sichtweise [WEST00a]). Auf Grund der zunehmenden Variationen der Produktionsaufgabe im turbulenten Umfeld der variantenreichen Serienfertigung erhöht sich die Frequenz der Planungszyklen, so dass diese kleinschrittiger werden (vgl. [STRU14]). Die einzelauftragsbezogene Regelung vollzieht sich hingegen kurzfristig zu bestimmten Zeitpunkten bzw. in vorgegebenen Intervallen und wird stets dann aktiv, wenn es in abgegrenzten Produktionsbereichen (Leistungseinheiten) zu Abweichungen vom ursprünglichen Planzustand auf Grund von Störungen oder schwankenden Belastungen kommt (mikroskopische Sichtweise [WEST00a]). Insofern nähern sich die Planungsaktivitäten in ihrer Fristigkeit vermehrt den Steuerungseingriffen an, da die durchschnittsorientierte Beurteilung der Auftrags- bzw. Belastungssituation zunehmend an Aussagekraft für die Erzeugung von Stellgrößen verliert [WIEN06].

Zusätzlich zur Dynamik der Änderung der systemischen Belastung sind aus unerwarteten – zumeist störungsbedingten – Ereignissen resultierende Abweichungen vom ursprünglichen Produktionsplan vor allem für die Steuerung entscheidend, weil sie seine Einhaltung gefährden [WIEN06], [BORN09]. Die Komplexität des Produktionssystems resultiert daher aus der steuerungsrelevanten Volatilität (Abweichungen) und leitet sich darüber hinaus maßgeblich aus der durch das Produktionsprogramm repräsentierten Fertigungsaufgabe sowie der realisierten fabrikplanerischen Lösung in Sinne der vorhandenen Produktionsstrukturen ab.

Nach der Kategorisierung von Änderungen der Produktionsaufgabe folgt an dieser Stelle eine Charakterisierung störungsbedingter Abweichungen.

Störungen werden als unerwartete ([RÖTZ01], [KUHL95]), unplanmäßige ([FISC09], [RÖTZ01], [LAGE08]) und damit zufällige ([FISC09], [ALCA00]) Ereignisse angesehen, die zeitlich begrenzt sind [KUHL95]. Demnach kennzeichnet sie ihre Unvorhersehbarkeit sowie ihr unbekannter Eintrittszeitpunkt [STRI14]. Störungen wirken sich mithin als unbeabsichtigte und ungewollte Variation der normalen Betriebsbedingungen aus [STRI14], [MÖSS99]. Damit lassen sich störungsbedingte Abweichungen allgemein als Unterschreitung der geforderten Leistungsfähigkeit des Produktionssystems oder seiner Elemente im Sinne einer mangelnden Funktionserfüllung auffassen ([MATY02], [DIN13306]). Dabei sind grundsätzlich zwei Ausprägungen zu unterscheiden:

- Beeinträchtigung: unbeabsichtigte Unterbrechung der vollständigen Funktionserfüllung eines Systemelementes oder
- Ausfall: unbeabsichtigter Verlust der Funktionsfähigkeit eines Systemelementes.

Demnach stellt eine Störung eine unzulässige Abweichung bis hin zur Unterbrechung des Produktionsprozesses in Folge einer Funktionsbeeinträchtigung bzw. eines Ausfalls der Funktionalität einer technischen oder personellen Ressource dar [MATY05], [RÖTZ01], [LAGE08]. Daraus resultiert eine nachteilige Auswirkung auf die Qualität eines Produktes, den Leistungsgrad oder die Verfügbarkeit der Systemelemente während des Betriebes derselben (vgl. [LAGE08], [MATY05], [ALCA00], [MEXI94]). Die Nachteiligkeit bezieht sich auf signifikante Abweichungen von Vorgaben und gestellten Anforderungen an das Produktionssystem und ist damit mit negativen Einwirkungen auf den Leistungserstellungsprozess hinsichtlich der Zielgrößen verbunden [FISC09]. Die ungewollten Variationen beziehen sich auf die Dauer des Leistungserstellungsprozesses und die Art, Anzahl sowie den Zeitpunkt der Bereitstellung von Input bzw. Output (Erzeugnisse).

Das Versagen eines Elementes oder Subsystems zieht zumindest eine Beeinträchtigung der vollständigen Funktionserfüllung des übergeordneten Systems nach sich. Deshalb folgt dem Ausfall einer funktionalen Einheit stets eine Abweichung im Produktionsprozess. Aus Störungen bzw. Beeinträchtigungen resultiert in der Regel eine Reduktion der Leistungsfähigkeit des Systems durch Einschränkung des Kapazitätsangebots. Auf Grund der Verminderung der kapazitiven Leistung sinkt der Durchsatz. Dadurch erhöht sich der Bestand und somit auch die Durchlaufzeiten der Aufträge (vgl. [NYHU12]). Allgemein führen Störungen dazu, dass Aufträge bzw. Teile in der Produktion warten müssen, bis sie an einem Arbeitssystem bearbeitet oder zum nächsten transportiert werden. Dies führt zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit, die umso größer wird, je mehr sich der Durchsatz der Kapazitätsgrenze nähert. Dadurch, dass vermehrt Teile warten, erhöht sich wiederum deren Gesamtanzahl und damit der Umlaufbestand (vgl. [NYHU12]).

Die Wirtschaftlichkeit und Produktivität eines Produktionssystems wird folglich durch Störungen und Beeinträchtigungen der erforderlichen Ressourcennutzung begrenzt. Die gesamtsystemische Effizienz ergibt sich dabei aus dem Wirkungsgrad der Teil- und Subsysteme und ihrem synergetischen Zusammenwirken [WEST16].

2.4 Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen

Vor dem Hintergrund exogener Turbulenzen und endogener Störereignisse existieren zahlreiche Begrifflichkeiten in Literatur und Praxis, die die jeweiligen Phänomene charakterisieren und Ansätze zur Bewältigung dieser Variabilität verdeutlichen sollen. Die Veränderungsimpulse sind zur Gewährleistung des wirtschaftlichen Fortbestehens des Unternehmens notwendigerweise durch eine geeignete Produktionsstruktur derart zu beherrschen, dass die anstehenden Produktionsaufgaben erfolgreich erfüllt werden können. Darüber hinaus hängt die Überlebensfähigkeit von Produktionssystemen in einer

turbulenten Umgebung maßgeblich davon ab, dass sie in der Lage sind, sich permanent strukturell gemäß den geltenden Anforderungen anzupassen bzw. auf die geforderte Variabilität eingestellt zu sein [WEST16].

Vor diesem Hintergrund soll die Fähigkeit, Anpassungen im Unternehmen an sich ändernde Bedingungen vornehmen zu können, zunächst allgemein als Veränderungsfähigkeit bezeichnet werden (vgl. [WIEN02a]). In der wissenschaftlichen Literatur finden sich diesbezüglich zahlreiche begriffliche Interpretation und teilweise divergente Definitionen. Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere auf die Begriffe Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Robustheit und Resilienz eingegangen, da diese im Kontext von Produktionssystemen der variantenreichen Serienfertigung die wesentlichen Aspekte der Veränderungsfähigkeit tangieren.

2.4.1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Im betriebswirtschaftlichen und produktionstechnischen Kontext erfolgt die Verwendung des Flexibilitätsbegriffs in einer mitunter sehr weiten Fassung. Synonym werden in diesem Zusammenhang u. a. folgende Bezeichnungen verwendet: Elastizität [SCHN96], [KOBY00], [KALU05], Variabilität [KOBY00], Adaption [DANG03], Reagibilität [SCHN96], Anpassungsfähigkeit [KÖTT16], [KALU05], Wandlungsfähigkeit [WIEN09] bzw. robuste Produktion [KOBY00].

Zunächst soll auf den Begriff der **Flexibilität**, der zu den geläufigsten zählt, eingegangen werden. In der produktionssystemischen Sicht existieren unterschiedliche Differenzierungen je nach Granularität der Betrachtung und dem Analyseobjekt. So steht Flexibilität häufig stellvertretend für die Fähigkeit eines Systems, sich an Veränderungen anzupassen [SCHN96]. Die Vielfalt der Produkte, Prozesse und Aktivitäten, welche das System bewältigen muss, sowie der Wunsch eines Unternehmens danach, die künftige Nachfrage zu prognostizieren, d. h. den Grad der Unsicherheit, unter der es betrieben wird, zu minimieren, stellen die maßgeblichen Gründe für das Flexibilisierungsstreben dar [SLAC87].

Die statische Flexibilität beschreibt dabei die Fähigkeit, in einer definierten Spannweite von Produkten, Prozessen und deren Mengen in Hinblick auf die betrieblichen Ziele kurzfristig stabil zu operieren [DETO98]. Somit unterstützt sie die Stabilität der Funktionserfüllung des betrachteten Produktionssystems. Maximale Stabilität lässt sich allerdings nur unter konstanten Umweltbedingungen erreichen, so dass keine exogenen Änderungserfordernisse bestehen und somit die internen Abläufe und Strukturen mittels Optimierung und Standardisierung bestmöglich aufeinander abgestimmt werden können [KÖTT16]. Daraus resultiert die Effizienz und Effektivität des Produktionssystems und damit die Erreichung der grundsätzlichen Zielgrößen hinsichtlich Kosten, Produkt- und Prozessqualität.

Die dynamische Flexibilität bezieht sich auf die Fähigkeit, ein Produktionssystem kapazitiv, strukturell bzw. ablaufbezogen anzupassen [DETO98]. Dieser Aspekt betrifft also das Vermögen zur endogenen Veränderung des Systems. Ist eine kurzfristige Anpassung möglich, ohne dass dabei Änderungen der räumlichen Struktur oder der Systemzusammensetzung vorgenommen werden [SCHM95], handelt es sich um die Basisflexibilität [REFA90]. Dagegen erfordert die Erweiterungsflexibilität eine längere Umsetzungsphase, ermöglicht aber auch einen größeren Handlungsspielraum [REFA90]. Flexibilität stellt damit eine in einem bewussten Vorgang geschaffene Systemeigenschaft dar, auf die mitunter kurzfristig zurückgegriffen werden kann [SCHN96].

Das Wesen der Anpassung ist dem Flexibilitätsbegriff inhärent. Hinsichtlich eines Produktionssystems lässt sich dabei zunächst zwischen quantitativen, qualitativen und strukturellen Aspekten unterscheiden [WIEN09], [WIEN04]. Entsprechend der grundlegenden Produktionsfaktoren können sowohl personelle als auch technische Ressourcen hinsichtlich ihrer qualitativen und quantitativen Flexibilität differenziert werden. Bei der quantitativen Betrachtung sind Anforderungen bezüglich saisonaler Schwankungen und Absatzänderungen für die Produktionsmenge von Bedeutung [REFA90], [GOTT78],

[LORE96], [WIRT89]. Automatisierungsgrad und Anpassung des Personaleinsatzes sind dabei entscheidende Kriterien. In diesem Kontext beschreibt die qualitative Flexibilität die Fähigkeit, Umrüstvorgänge kurzfristig durchführen zu können. Mittel- und langfristig bezieht sich die qualitative Flexibilität auf die Fähigkeit, Folgeprodukte mit dem bestehenden System produzieren zu können oder große Teile des Systems bei einem Umbau weiter verwenden zu können [GOTT78]. Die strukturelle Flexibilität betrifft zum einen die Arbeitsstruktur, d. h. das Zusammenwirken und die Kooperation der Arbeitskräfte [HILD05], und zum anderen die Produktionsstruktur an sich, hier maßgeblich bezogen auf den räumlichen Aspekt der Arbeitsmittelanordnung [HILD05], [WIEN04], [KALU05], [GOTT78], [WIRT89].

Insbesondere die strukturelle Flexibilität wirkt sich somit auf das Potenzial des Systems aus, ablauf- und anordnungsbezogen angepasst zu werden, wogegen sich die qualitativen und quantitativen Dimensionen auf Änderungen der Systemzusammensetzung beziehen.

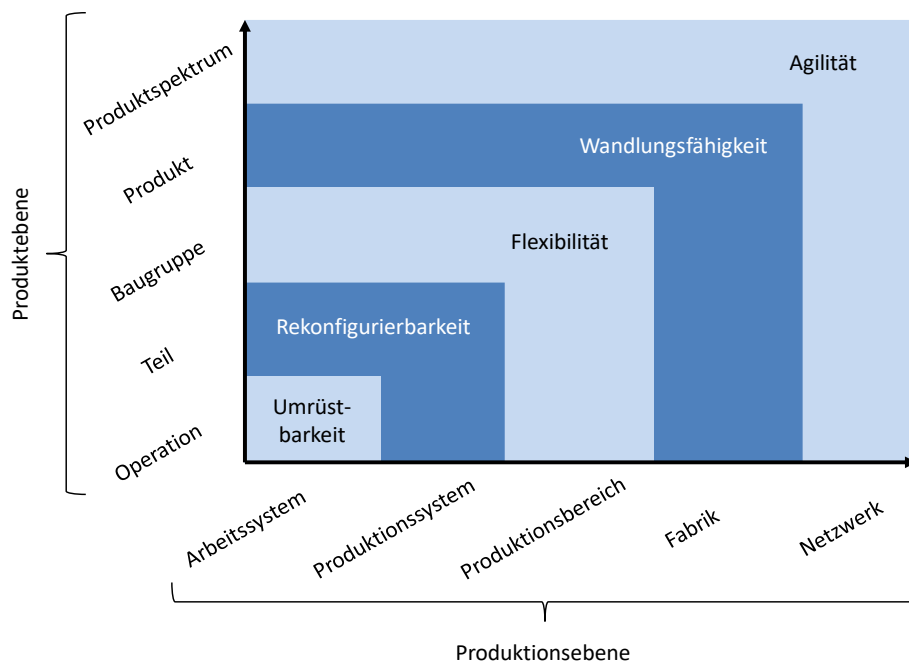


Abbildung 2-11: Dimensionen der Veränderungsfähigkeit [WIEN02a]

Unter dem Oberbegriff der Veränderungsfähigkeit unterscheidet Wiendahl je nach Leistungsebene hinsichtlich des Produktes sowie des Produktionsprozesses fünf Dimensionen von Veränderungsfähigkeit (Abbildung 2-11): Umrüstbarkeit, Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Agilität [WIEN02a]. Die ersten beiden beziehen sich auf der Vorgangsebene auf die Umstellung einzelner Arbeitsmittel bzw. eines Arbeitssystems [ARNO08], [WIEN09a]. Ähnlich wie die *Reagibilität*, die die Fähigkeit eines Systems bezeichnet, den Durchsatz ohne Totzeit qualitativ und/oder quantitativ auf veränderte Vorgaben abzustellen [SCHN96], wird die reaktive Umstellung auf artähnliche Produktgruppen innerhalb eines Produktionsbereichs durch prozessuale und organisatorische Anpassungen als Flexibilität definiert [WIEN02a], [ARNO08]. Auf der taktischen Ebene umfasst die Wandlungsfähigkeit die reaktive und proaktive Veränderung der gesamten Fabrikstruktur, um die Herstellung bekannter oder neuartiger Erzeugnisse zu ermöglichen. Abschließend bezeichnet die Agilität das Vermögen, strategische Veränderungen zur Erschließung neuer Märkte durchzuführen [ARNO08], [WIEN09a]. Die strikte Zuordnung von Produkt- und Herstellungsebene ist bei der Begriffsdefinition insofern als problematisch anzusehen, als dass je nach Gestaltung des betrieblichen Wertschöpfungsprozesses und ab-

hängig von der Erzeugnisstruktur auch Umstellungen in einem Produktionsbereich (Flexibilität) Auswirkungen auf das gesamte Produktspektrum (Agilität) haben können. Ebenso können operationsbezogene Änderungen (Umrüstbarkeit) die Leistungsfähigkeit der Fabrik (Wandlungsfähigkeit) oder sogar das ganze Produktionsnetzwerk (Agilität) beeinflussen.

Fluktuationen des Umfelds können aus systemtheoretischer Sichtweise entweder durch eine Anpassung der Systemstruktur (Flexibilität) oder eine Veränderung des Systems selbst (Wandlungsfähigkeit) ausgeglichen werden [HERN05]. Dabei bezieht sich die strukturelle Umgestaltung jedoch nur auf die Systemrelationen (Strukturkopplung) [HERN02] und somit eher auf die Ablaufstruktur. Die Transformation verändert hingegen nicht nur die bestehenden Beziehungen, sondern auch die Eigenschaften und Funktionen der Ressourcenelemente derart, dass sich gänzlich neuartige Strukturen und Systeme ergeben [HERN02]. Dies wirkt sich demzufolge auf den Systemaufbau aus.

Die Reaktionsfähigkeit beschreibt in diesem Kontext das Potenzial zur Anpassung jenseits der durch die Basisflexibilität definierten Dimensionen [REIN00] und ist somit vergleichbar mit der Erweiterungsflexibilität [REFA90]. Wandlungsfähigkeit als Kombination von Reaktionsfähigkeit und Flexibilität entspricht damit der Fähigkeit, reaktiv Verschiebungen der vorgedachten Korridore bei unvorhergesehenen Anforderungen vorzunehmen (vgl. [REIN00]). Daher kann sie als Vermögen zur Anpassung der systemimmanenten Veränderungsfähigkeit aufgefasst werden.

Flexibilität ist als Mittel zum Zweck zu verstehen, um Verbesserungen bestimmter Eigenschaften eines Produktionssystems zu erreichen [SLAC87]:

- verbesserte Produktverfügbarkeit, z. B. kürzere Durchlaufzeiten oder vergrößertes Produktspektrum (Perspektive des Kunden)
- zuverlässigere Lieferung, z. B. termintreue Produktabwicklung selbst bei unzuverlässiger Zulieferung oder unsicherer Prozessqualität (Perspektive des Lieferanten)
- erhöhte Produktivität, z. B. erhöhte Ausnutzung der Arbeitsmittel, Arbeitskräfte oder Materialien (Perspektive des Produktionssystems an sich)

Vereinfacht lässt sich hierbei die Fähigkeit zur Anpassung zum einen der Funktion eines Produktionssystems (z. B. Einführung eines neuen Produktes, d. h. Produktart- und Produktmixflexibilität) und zum anderen der systemischen Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit (Mengen- und Lieferflexibilität) differenzieren.

Die Relevanz einzelner Flexibilitätsbereiche (Einführung von Produktveränderungen, Ermöglichen unterschiedlicher Produktmixe, Anpassung der Ausbringungsmenge, Verändern der Liefertermine [MAND87]) hängt von der Wettbewerbsposition und Art des Produktionssystems ab [SLAC87]. Da das Vorhalten eines gewissen Grades an Veränderungsfähigkeit monetären Aufwand bedeutet, konzentrieren sich die Unternehmen auf die Aspekte, die ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Zudem hat die Ausgangskonfiguration eines Produktionssystems maßgeblichen Einfluss auf seine Anpassungsfähigkeit und die damit einhergehenden Kosten (vgl. „path dependency“ [CORD13]).

2.4.2 Robustheit und Resilienz

Darüber hinaus identifiziert Mandelbaum mit der **Robustheit** einen weiteren Aspekt der Flexibilität. Dabei steht das Vermögen eines Systems, seine Funktionsfähigkeit trotz Veränderungen aufrecht zu erhalten [MAND87], im Mittelpunkt. Während es bei Flexibilität um Anpassungen geht, liegt der Fokus bei robusten Systemen auf der Konstanz der Funktionserfüllung. Funktionsfähigkeit beschreibt in die-

sem Rahmen das Vermögen eines Systems, eine geforderte Funktion unter gegebenen Anwendungsbedingungen für eine bestimmte Zeitspanne zu erfüllen [DIN60050]. Haller sieht hingegen Stabilität und Robustheit als Flexibilitätsziele an, wonach das angestrebte Systemverhalten sowohl bei kurzfristigen Bedarfsänderungen als auch im Störfall trotz der intrinsischen Dynamik und der systeminherenten Komplexität gewährleistet werden soll (vgl. [TIER07], [HALL99]).

Robustheit bezeichnet somit die Fähigkeit eines Systems, seine Funktion auch bei schwankenden Umgebungsbedingungen oder störungsbedingten Abweichungen aufrecht zu erhalten [VLAJ12]. Dies berücksichtigt sowohl die Funktionserhaltung zu einem gewissen Grad, z. B. im Sinne der Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse (gemessen an betrieblichen Zielen) [BUND06], als auch die Resistenz gegenüber bestimmten internen oder externen Einflüssen [DEGO14], [VDA07]. Im Sinne einer zuverlässigen Funktionserfüllung wird somit das Vermögen eines Produktionssystems definiert, einer bestimmten Beanspruchung standzuhalten, ohne dabei eine Verschlechterung zu erleiden oder einen Verlust der Funktionalität einzubüßen [TIER07]. Als Beanspruchung werden die zielgrößenbezogenen Auswirkungen der Belastung auf das System in Abhängigkeit von seinen grundsätzlichen und aktuellen Voraussetzungen (Leistungspotenzial sowie Belastbarkeit im Sinne der Robustheit) subsummiert (in Analogie zu [DIN10075]).

Hierbei erscheint die Festlegung einer gewissen Toleranzbreite sowohl hinsichtlich der etwaigen Dauer einer Funktionsbeeinträchtigung als auch bezüglich ihrer Stärke sinnvoll, um zufälligen oder systematischen Schwankungen der Zielgröße Rechnung zu tragen [BECK14]. Insofern verbleibt das System in seinem vorherigen Gleichgewichtszustand unter Beibehaltung seiner ursprünglichen strukturellen Konfiguration [WIEL12], [ASBJ99]. Im Gegensatz dazu bezieht Kitano auch gewisse Strukturanpassungen im Sinne des Wechsels der Arbeitsweise in seine biologiegelorientierte Robustheitsauffassung mit ein, solange bestimmte systemische Funktionalitäten trotz auftretender Störereignisse aufrecht erhalten bleiben [KITA04].

Robustheit repräsentiert daher ein vorab geplantes und proaktiv installiertes Eigenschaftsbündel [WIEL12], aus dem eine Widerstandsfähigkeit gegenüber antizipierten Störeinflüssen und Veränderungsimpulsen resultiert, auf die sich das Produktionssystem eingestellt hat und demzufolge vorbereitet ist [WIEL13]. In diesem Zusammenhang tragen die unterschiedlichen Flexibilitätsarten eines Systems zu seiner Robustheit bei, weil sie eine Anpassung an veränderte Anforderungen ermöglichen bzw. unterstützen. Nur wenn ein Unternehmen flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen oder interne Störungen reagieren kann, wirken sich diese nicht auf seine intrinsische Leistungsfähigkeit aus.

Daher ist es wichtig zu definieren, wogegen (d. h. gegenüber welchen Einflussgrößen) das Produktionssystem robust sein soll. Dementsprechend definiert de Goede Robustheit als Zustand zwischen Stabilität und Störungsanfälligkeit (Labilität) [DEGO14]. Stabile Produktionssysteme neigen dazu, ihren funktionstüchtigen Zustand auch bei geänderten Umfeldfaktoren oder auftretenden Störungen beizubehalten, ohne dass dabei unerwünschte Veränderungen stattfinden [AGGT90]. Stabilität definiert folglich eine bestimmte Leistung des Systems mit gewünschter Funktionalität [WILM08]. Demzufolge zeigt sich der Grad an Robustheit eines Systems erst, wenn eine zuverlässige Funktionserfüllung nicht mehr gewährleistet ist. Robuste Produktionsprozesse sind daher gekennzeichnet durch das Ausmaß der Änderung der relevanten Kennzahlen (z. B. Durchlaufzeit, Lagerbestand, Termintreue) abhängig von internen und externen Faktoren (z. B. Ausschuss-/Nacharbeitsquote, Absatzschwankungen, Bearbeitungs-/Rüstzeiten) [JODL08], [JODL08a].

Falls die antizipierte Robustheit nicht ausreicht und Umstände eintreten, die nicht vorhergesehen wurden, ist eine Rekonfiguration des Systems erforderlich. Während Flexibilität eine Systemeigenschaft im Sinne des Handlungsspielraums beschreibt, wird unter **Adaption** die Veränderung der Struktur

durch Anpassung der Elemente hinsichtlich Anzahl, Beschaffenheit, Anordnung und Vernetzung verstanden [POHL14]. Dies zieht mitunter eine Änderung des Verhaltens oder der Funktionsweise auf Gesamtsystemebene nach sich und kann mit einer Abstimmung des betrieblichen Zielsystems einhergehen [DANG03] und subsummiert folglich die strukturelle Umgestaltung sowie die Transformation des Produktionssystems.

Um die gesamte Bandbreite der Reaktionsmöglichkeiten einzuschließen, wird im Rahmen dieser Arbeit im Fortgang von der **Agilität** als Oberbegriff für die Systemeigenschaft gesprochen, die es ermöglicht, umgehend die notwendigen Adaptionen vornehmen zu können, um auf unerwartete Veränderungsimpulse zu reagieren [WIEL13]. Darunter werden alle reaktiven Maßnahmen und Strategien zusammengefasst, die eine zielgerichtete Anpassung fördern. Im Gegensatz zur zuvor definierten Reaktionsfähigkeit zählt auch ein Kontrollmechanismus dazu, der das frühzeitige Erkennen von Umweltveränderungen und Störereignissen unterstützt, um so die Reaktionsschnelligkeit zu erhöhen [WIEL13].

Ein umfassendes Konzept für den Umgang mit systemischen Veränderungsimpulsen, das sowohl Robustheit als auch Agilität verbindet, stellt die **Resilienz** dar. Es ist die Fähigkeit eines Systems, zu seinem Ausgangszustand zurückzukehren oder einen neuen Gleichgewichtszustand einzunehmen [DEGO14]. Je nach Kontext kann darunter zum einen verstanden werden, dass ein technisches System nach einer Störung zu einem funktionsfähigen Zustand zurückkehrt (Ingenieurssichtweise) oder zum anderen, dass ausreichend Abfangvermögen vorhanden ist, um strukturelle Änderungen zu vermeiden (Sichtweise eines Ökosystems) [BHAM11]. Im Gegensatz zur Robustheit kann sich dabei die Konfiguration des Systems durch die erforderlichen Anpassungen zur Erhaltung oder Wiedererlangung der Funktionalität mitunter grundlegend ändern [ASBJ09], [ASBJ99]. Dabei kann Resilienz einerseits anhand der Zeit beurteilt werden, die benötigt wird, um sich von einer Störung zu erholen [HOLL96]. Dies betrifft spezielle Regelungsmechanismen und deren Vermögen, eine effiziente Funktionsausübung zurückzuerlangen. Andererseits ist das maximale Ausmaß einer Störung, die ein System aufnehmen kann, bevor es zusammenbricht, charakterisierend dafür, wie resilient es ist [HOLL96].

Insofern beschreibt Resilienz zusammenfassend eine Kombination aus Widerstandsfähigkeit (Robustheit) und Selbstregulation (Agilität) [WIEL12], d. h. die Fähigkeit eines Produktionssystems, Einflussgrößen entweder durch Resistenz ihnen gegenüber zu tolerieren oder durch eigene Anpassung der neuen Situation zu begegnen. Dementsprechend trägt die ressourcenorientierte Wandlungsfähigkeit wiederum dazu bei, dass ein System resilient ist. Jeglichen Störungen bzw. Beeinträchtigungen (Variationen oder Abweichungen), denen nicht proaktiv und antizipativ vorgebeugt werden kann (z. B. durch Kontroll- bzw. Beherrschungsmaßnahmen), muss das System mit entsprechenden Strukturadaptionen begegnen. Insbesondere dieser Aspekt bezieht sich auf die Fähigkeit, sich selbststeuernd wieder in eine stabile Lage zu versetzen. In diesem Zusammenhang werden unter **Selbstregulation** (Selbstoptimierung) eines Systems einerseits die endogene Änderung des Zielsystems bei veränderten Umweltbedingungen und andererseits die zielkonforme autonome Anpassung der Struktur, des Verhaltens, der Funktionsweise sowie der Parameter dieses Systems verstanden [DANG03]. Damit geht die Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionstrategien wesentlich hinaus, weil die inhärente Intelligenz es dem Produktionssystem ermöglicht, selbständig und flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren. Bei soziotechnischen Systemen stellen dabei die menschlichen Entscheider die intelligenten Elemente dar. Somit steht der Mensch mit seiner Antizipation und Interpretation der Sachlage und den darauf beruhenden Entscheidungen im Mittelpunkt resilienter Produktionssysteme.

2.5 Handlungsbedarf für die Veränderungsfähigkeit in der Praxis

Speziell Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung unterliegen auf Grund ihrer Charakteristik in besonderem Maße turbulenten Veränderungen ihrer Umwelt, wodurch wechselnde Anforderungen an die Leistungserstellung resultieren. Das Auftreten von Störereignissen erschwert einen zielgerichteten Produktionsbetrieb auf Grund der intern entstehenden Komplexität zusätzlich.

Insofern existieren zwei Kernursachen, die die beabsichtigte Funktion (Herstellung bestimmter Güter in definierter Anzahl zu vorgegebenen Zeitpunkten) eines Produktionssystems entscheidend beeinträchtigen und somit auf Basis der vorgesehenen Aufbau- und Ablaufstruktur erst das tatsächliche Systemverhalten offenbaren: die exogen induzierte Turbulenz des Produktionsumfeldes und die endogen auftretenden Störereignisse. Während erstere die Belastungssituation betrifft und somit die Eignung der etablierten Produktionsstruktur hinsichtlich der gestellten Leistungsanforderungen in Frage stellt, wirken sich letztere vordergründig negativ auf das Kapazitätsangebot der personellen und technischen Ressourcen bzw. die Verfügbarkeit der Arbeitsgegenstände aus und fordern damit die systemimmanente Belastbarkeit (Leistungsfähigkeit) heraus.

Auf Grund von Fluktuationen und unvorhersehbaren Abweichungen vom Produktionsplan funktioniert zudem die übliche enge Kopplung von Planung und Steuerung über Mittelwert und Streuung nicht mehr in allen Fällen [WEST00a]. Daher ist eine Betrachtung anhand von Zeitreihen oder dynamischer Modellierung unerlässlich, um so Verhaltensweisen und resultierende Effekte zu beobachten [STRU04]. Dabei sind auf Grund der Komplexität des Produktionssystems und verstärkt durch die Heterogenität seiner Strukturen vermaschte bzw. kaskadische Regelkreise (vgl. [NYHU09]) nötig, um die Vielzahl der vorgegebenen Plangrößen auf allen Handlungsebenen gezielt überwachen zu können und der zunehmenden Frequenz sowie der Unvorhersehbarkeit von Variationen der Produktionsaufgabe Rechnung zu tragen.

In einem Produktionssystem definiert die Produktionsstruktur das Potenzial, bei Variationen des Produktionsprogramms oder störungsbedingter Abweichungen weiterhin wirtschaftlich produzieren zu können [WIEN04]. Besonders die Resilienz ermöglicht hierbei die notwendige Selbstregulation des Systems. Zum frühzeitigen Wahrnehmen und Erkennen von Veränderungsimpulsen bedarf es allerdings einer methodischen Unterstützung der betrieblichen Akteure.

Hierbei sind die Auswirkungen auf Produktionsstrukturen zu bewerten. Bislang erfolgt die Betrachtung der Aufbaustruktur lediglich im Planungsstadium. Zeitliche Aspekte bleiben dabei zumeist unberücksichtigt. Im Gegensatz dazu erfolgt der Strukturbetrieb oftmals nur mit kurzfristiger Sichtweise, wobei die Hauptinformationsquelle zur Rückmeldung über den momentanen Zustand eines Produktionssystems die Auftragsüberwachung darstellt. Die strukturelle Konfiguration wird in diesem Zuge üblicherweise nicht mehr in Frage gestellt. Allerdings führen stetige Veränderungen der Produktionsstruktur infolge der kontinuierlichen Prozessoptimierung sowie der einem permanenten Wandel unterzogenen Kundenbedarfe mithin dazu, dass die ehemals effiziente Konfiguration des Systems allmählich überholt ist.

Deswegen wird die systematische Unterstützung durch betriebliche Informationssysteme benötigt, die aussagekräftige Kennzahlen zur Strukturbeurteilung in hinreichenden Zeitintervallen zur Verfügung stellen. In diesem Zusammenhang rücken neben der Ablaufregelung (PPS) vor allem die Aspekte der funktionalen und räumlichen Struktur in den Mittelpunkt des Interesses, da deren Auswirkungen auf die Qualität des Leistungserstellungsprozesses bei wechselnden Produktionsaufgaben im laufenden Betrieb in der Regel vernachlässigt werden.

Dementsprechend bedarf es einer methodischen Entscheidungsunterstützung, um die Selbstregulierung der einzelnen Leistungseinheiten in Form struktureller Adaptionen zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang sollte der Fokus nicht unikal auf der Effizienz des Produktionssystems beim Betreiben desselben liegen. Insbesondere auf Grund des stetigen Wandels ist auch der Resilienz-Aspekt bei einer möglichen Strukturadaption zu berücksichtigen, um so einen Erhalt der Funktionalität zu gewährleisten.

Daher werden im Fortgang geeignete Ansätze, Methoden und Modelle auf Basis des Forschungsstandes der Wissenschaft vorgestellt und auf ihre Tauglichkeit zur Behebung der identifizierten Defizite geprüft.

3 Ansätze zur Bewertung resilienter Produktionsstrukturen

In diesem Kapitel werden wesentliche Beschreibungs- und Einflussgrößen von Produktionssystemen auf Basis einer differenzierten Betrachtung ihrer Strukturdimensionen identifiziert und systematisiert.

Im Anschluss erfolgen Darlegungen zu gängigen Methoden und Maßzahlen zur Bewertung von Produktionsstrukturen hinsichtlich der Effizienz und Effektivität ihrer Funktionserfüllung sowie mit Blick auf die unterschiedlichen Aspekte der Veränderungsfähigkeit. Abschließend wird der bestehende Forschungsbedarf im Kontext der strukturellen Beurteilung der Eignung und Resilienz von Produktionssystemen abgeleitet.

3.1 Konfigurationsparameter von Produktionsstrukturen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung von Produktionsstrukturen in ihren Ausprägungen vorgestellt (vgl. [BAUM02], [KAUT96], [KLÄB86], [WOIT77]). Anhand dieser Stellgrößen und Beschreibungsmerkmale lässt sich die strukturelle Konfiguration von Produktionssystemen und deren Beeinflussbarkeit ableiten.

Ausgangspunkt stellt das Produktionsprogramm als Manifestation des Kundenbedarfs dar. Neben den langfristigen betrieblichen Zielen bestimmt die Auftragssituation maßgeblich die strategische Ausrichtung des Produktionssystems. Anschließend werden die charakteristischen Merkmale der funktionalen, räumlichen und zeitlichen Struktur Aspekte mit Blick auf den Systemaufbau und das gezeigte Verhalten beleuchtet.

Die Festlegung der Systemzusammensetzung durch Bildung einzelner Leistungseinheiten (funktionale Struktur) berücksichtigt bereits die Grundausrichtung des jeweiligen Produktionssystems. Auf Basis der infolge dessen nach Art und Anzahl definierten Elementemenge charakterisiert die räumliche Struktur in Form der topologischen Grundordnung der Ressourcenelemente den Systemaufbau. Zusammen mit der Aufbaustruktur bestimmt die zeitliche Struktur als Ablaufstruktur des Produktionssystems entscheidend das Systemverhalten.

Insofern können der Systemaufbau bzw. die Aufbaustruktur (funktionale und räumliche Struktur) als statischer Rahmen angesehen werden, innerhalb dessen sich der Produktionsprozess im Sinne der Ablaufstruktur (zeitliche Struktur) vollzieht und dabei ein bestimmtes Systemverhalten offenbart.

3.1.1 Parameter des Systemaufbaus

Die funktionale Struktur bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit die Zusammenfassung von Arbeitsplätzen (Arbeitssystemen) zu übergeordneten Leistungs- bzw. Organisationseinheiten (Produktionssystemen), die für die Herstellung eines bestimmten Produktspektrums ausgelegt sind, und deren konkrete Verknüpfung und Anordnung. Im Sinne einer Grobstrukturbildung bezieht sie sich auf eine übergeordnete Betrachtungsebene mit höherem Abstraktionsgrad und spiegelt somit den Kernaspekt der strategischen Orientierung des Produktionsbereichs wider (vgl. [WILD94]).

In diesem Zusammenhang können Leistungseinheiten hinsichtlich der maßgeblichen Ausrichtung ihrer Maschinenanordnung entweder in eine funktionsorientierte Artaufstellung (Technologieorientierung → Verrichtungsprinzip) oder eine objektorientierte Zweckaufstellung (Produkt- bzw. Prozessorientierung → Gegenstandsprinzip) unterschieden werden (vgl. Segmentierung der Fertigung [AGGT90]). Dabei steht die materialflussbezogene Topografie der technischen Systemelemente im Vordergrund.

Tabelle 3-1: Übersicht potenzieller Strukturbildungskriterien

Übergeordnete Bildungskriterien	Untergeordnete Bildungskriterien
Produkt	Produktstruktur Fertigungsform Werkstoff
Materialfluss	Kommunikation
Betriebsmittel	Technologie
Personal/Qualifikation	Organisationsform

Daneben existieren allerdings noch weitere Aspekte, die zur Bildung von organisatorischen Einheiten herangezogen werden. Bezieht sich Eversheim [EVER89] noch auf sechs verschiedene strukturbildende Prinzipien, geht Rietz [RIET01] davon aus, dass sich die prinzipiellen bzw. funktionalen Strukturtypen je nach Dominanz der Markt-, Prozess- und/oder Fähigkeitsanforderungen – sogenannte **Grobstrukturierungskriterien** (vgl. [RIET01], [HENN99], [AGGT90]) – in vier Hauptansätze unterteilen lassen, welchen die übrigen Varianten oder Spezialfälle unterzuordnen sind (Tabelle 3-1):

- Produktorientierung,
- Materialflussorientierung,
- Betriebsmittelorientierung und
- Personalorientierung.

Hinsichtlich der **Spezialisierung** der Produktionsbereiche lassen sich zunächst produktspezifische Leistungseinheiten (Ein-Produkt-System) und Mehr-Produkt-Systeme (z. B. Model-Mix-Linie in der Automobilindustrie) differenzieren.

Bei organisatorischer Arbeitsteilung, die im Zuge der Bildung von Struktureinheiten entsteht, existieren zwei Spezialisierungsrichtungen. Zunächst erfolgt innerhalb von Organisationseinheiten in der Regel eine Konzentration auf bestimmte Arbeitsgegenstände (Produkte oder Teilegruppen) (Mengenteilung). In diesem Fall wird auch von einer **vertikalen Segmentierung** der Produktion gesprochen [WILD94]. Dies bedingt den Mehrproduktfall mit einem entsprechend breiten Produktspektrum. Im Fokus einer solchen Spezialisierung stehen die Anforderungen an die zu bildende Organisationseinheit, die aus der jeweiligen Produkt-Markt-Kombination erwachsen. Kernaspekte sind neben allgemeinen Wettbewerbsfaktoren wie Preis, Lieferzeit und Qualität vor allem:

- der Produktmix bzw. die Produktvielfalt, d. h. Anzahl an Erzeugnisarten, sowie
- die Menge, d. h. Produktionsvolumen und Losgrößen der einzelnen Produktgruppen.

Daneben ist eine Spezialisierung auf einzelne Fertigungsstufen bzw. Fertigungsverfahren für definierte Produktionsbereiche (Artteilung) denkbar, welche auch als **horizontale Segmentierung** bezeichnet wird [WILD94]. Voraussetzung hierfür ist, dass eine mehrstufige Produktion vorliegt. Zumeist erfolgt die horizontale Segmentierung im Anschluss an die vertikale und bezieht sich somit auf die innere Struktur der vorab gebildeten Organisationseinheiten. Grundlage sind technisch-technologische Charakteristika entlang des Herstellungsprozesses. Beide Ansätze lassen sich beinahe beliebig überlagern. Somit ergibt sich der Grad der Arbeitsteilung des Gesamtsystems bereits implizit aus der Festlegung der Art der Arbeitsmittel sowie deren Anzahl für die jeweiligen Struktureinheiten im Rahmen der Funktionsbestimmung bzw. Dimensionierung.

Die resultierende Systemzusammensetzung ist so ausgelegt, dass sie als vorhandenes Kapazitätsprofil möglichst das aus dem prognostizierten Produktionsprogramm erwachsene Belastungsprofil bewältigen kann [SCHM95]. Damit stellt die Gesamtheit der existierenden Systemelemente das funktionale Potenzial des Produktionssystems bereit. Insofern bedingt die Definition der Aufbaustruktur zunächst

die Festlegung der gegenüber ihrer Umgebung physisch oder gedanklich abgegrenzten organisatorischen Leistungseinheit (Produktionssystem) mit der Menge ihrer Systembestandteile (Systemzusammensetzung) [SCHM95]. Der Systemaufbau ist wesentliches Ergebnis der Strukturplanung. Dabei entziehen sich die strategischen Festlegungen u. a. des Grobstrukturierungsprinzips, des Kundenentkopplungspunktes [LOPI05], des Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsgrades [AGGT90] sowie weiterer betriebs- und arbeitstechnischer sowie ausführungsrelevanter Aspekte dem Betrachtungsbereich dieser Arbeit. Einzig ihre Auswirkungen auf die untergeordneten Strukturdimensionen werden an entsprechenden Stellen beleuchtet.

Die **Anordnung** der Ressourcenelemente ergibt sich als deren Topologie aus der örtlichen Konglomeration von Arbeitssystemen. Dabei werden grundsätzlich drei räumliche Strukturtypen unterschieden [WIRT89]: Punkt, Linie und Netz. Die Linienstruktur (Reihenanzordnung) ist durch einen gerichteten Materialfluss gekennzeichnet. Die Punktstruktur (Einzelplatz) besteht als Sonderform aus lediglich einem Arbeitssystem [SCHM70]. Die Netzstruktur (Werkstattstruktur) wiederum zeichnet sich durch einen insgesamt ungerichteten Materialfluss aus, in dem Rückflüsse auftreten. Die Vielfalt der strukturellen Ausprägungen ist nahezu unbegrenzt und hängt maßgeblich von der Kreativität des Planers ab [AGGT90], [RIE01]. Insofern stellt die konkrete räumliche Anordnung die maßgebliche Stellgröße des Systemaufbaus dar.

Die **Verkettung** von Ressourcenelementen referenziert zwar bereits auf ihre zeitlich-technische Kopplung, betrifft im Rahmen dieser Arbeit aber vor allem das Abstraktionsniveau der Betrachtung. Grundsätzlich lassen sich drei Formen verketteter Arbeitssysteme unterscheiden:

- starr (keine Puffer, sofortige Weitergabe - strikte Kopplung/Zwangsverkettung),
- elastisch (begrenzte Pufferkapazität, verzögerte Weitergabe möglich - teilweise Entkopplung) und
- lose (unbegrenzte Pufferkapazität, verzögerte Weitergabe möglich - vollständige Entkopplung).

Bei starrer Verkettung zweier oder mehrerer Arbeitsplätze bzw. Arbeitsstationen wird ihre Gesamtheit nachfolgend als ein Arbeitssystem angesehen, wobei innerhalb dessen lediglich ein Fördern der Arbeitsgegenstände erfolgt (vgl. [JÜNE00]). Demzufolge sind zwischen den technischen Ressourcen (Arbeitssystemen) stets Puffer vorzuhalten, die sich auf Grund ihres Flächenbedarfs auf die Layoutgestaltung auswirken.

Weiterhin bedingt die **Parallelität** gleichartiger Arbeitssysteme ihre Austauschbarkeit auf Basis ihrer Universalität bzw. (funktionalen) Redundanz und ist eng mit der **Verzweigung** des Materialflusses verbunden [AGGT90]. Hieraus ergibt sich die Unterscheidung in eine Parallel- oder eine Reihenanzordnung der Ressourcenelemente (gleichartige Arbeitssysteme hinsichtlich ihrer Funktionalität bzw. funktionsverschiedene Arbeitssysteme) bzw. in Mischformen (praktisch relevanteste Form) [DOMS97]. Die Parallelisierung gleichartiger Produktionsaktivitäten stellt eine Mengenteilung der jeweiligen technischen Ressourcen innerhalb einer Leistungseinheit dar. Das parallele Vorhalten von Kapazitäten im Sinne einer funktionalen Redundanz trägt wesentlich zur Robustheit von Produktionssystemen bei (vertiefend [MEYE16]). Die serielle Anordnung (Reihenanzordnung) ist dagegen stets mit einer Artteilung der entsprechenden Arbeitssysteme verbunden. Die resultierende Stufigkeit der Produktionsprozesse geht in der Regel mit einer Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsverfahren/Arbeitstechniken und damit einer Aufeinanderfolge mehrerer unterschiedlicher (arteiliger) Arbeitsstationen einher (vgl. [KAUT96]).

3.1.2 Parameter des Systemverhaltens

Die zeitliche Struktur drückt das dynamische Beziehungsgeflecht der gegenseitigen Zuordnung von Arbeitsgegenstand, Arbeitsmittel und Arbeitskraft (Ressourcenallokation) aus und entspricht damit weitestgehend der strategisch-taktischen Produktionsplanung. Dabei definiert der technologische Ablauf, der im Zuge der Funktionsbestimmung ermittelt wird, bereits die sachlogische Ressourcenallokation. Der konkrete zeitliche Bezug resultiert aus der Ablaufstruktur, die als Vorgabe für die Aktivitäten der Produktionsplanung und -steuerung anzusehen ist. Unter Einwirkung der spezifischen Umweltbedingungen (Turbulenz und störungsbedingte Abweichungen) ergibt sich daraus wiederum das Systemverhalten.

Aus den Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (Abbildung 3-1) lassen sich daher die wesentlichen Stellgrößen der Ablaufstruktur zur Beeinflussung der systemischen Verhaltensweise ableiten.

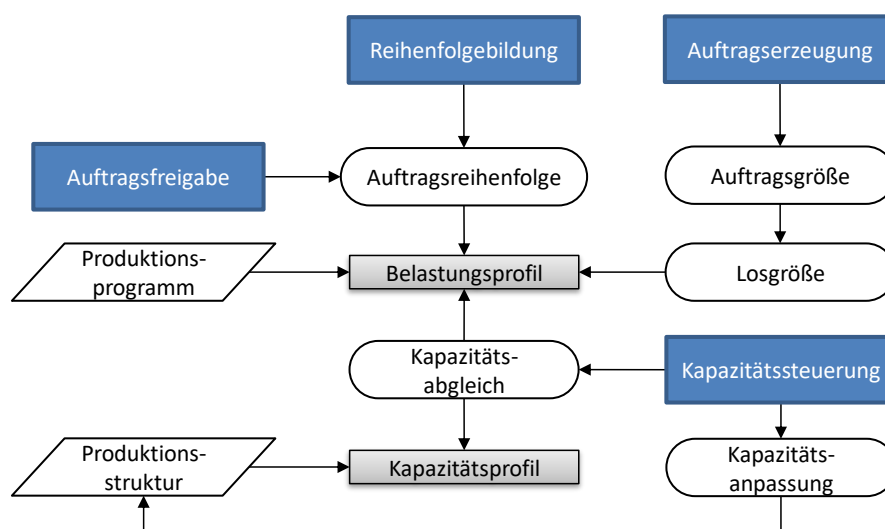


Abbildung 3-1: Wechselwirkung der PPS-Funktionen

Die **Auftragserzeugung** (Generierung von Fertigungsaufträgen) kann je nach Dispositionsart auf Basis von Kundenaufträgen (bedarfsorientiert), der Produktionsprogrammplanung (programm- bzw. prognoseorientiert) und/oder von Materialentnahmen (verbrauchorientiert) erfolgen [LÖDD08]. Hierbei werden über die Definition der Zu- und Abgänge die herzustellenden Produkte mengenmäßig geplant [LÖDD08]. Die Auftragserzeugung legt die Auflagenhöhe (Auftragsmenge) fest.

Die **Auftragsfreigabe** dient der Bestimmung des Zeitpunkts des Beginns der Auftragsbearbeitung. Es kann durchaus auch eine terminunabhängige sofortige Veranlassung des Fertigungsstarts erfolgen. Allerdings sind in der Regel zunächst eine Prüfung der Materialverfügbarkeit und die Auslösung der Materialbereitstellung (bestandsabhängige Auslösung der Bereitstellung des erforderlichen Materials) notwendig [SCHU12]. Infolgedessen wird der tatsächliche Zugang sowie die Auftragszuordnung des Ausgangsmaterials definiert [LÖDD08]. Daraus folgt die Chronometrie, d. h. der konkrete Zeitpunkt des tatsächlichen Produktionsbeginns, sowie die natürliche Chronologie (zeitliche Reihenfolge) der Aufträge.

Die Auftragserzeugung wird jedoch häufig an den Freigabemechanismus gekoppelt, so dass gängige Steuerungsverfahren häufig beide Funktionen (teilweise) übernehmen [KIEN11]. Daher fasst der Be-

griff **Auftragseinlastung** bzw. Auftragsveranlassung nachfolgend die Teilaufgaben der Auftragszerzeugung und -freigabe zusammen (vgl. [KIEN11], [ZÜLC90]). Damit entspricht sie der operativen Umsetzung der Ressourcenallokation.

Darüber hinaus existiert die Möglichkeit, die ursprüngliche **Reihenfolge** durch Vertauschungen innerhalb der Warteschlangen (Zugangspuffer) vor den einzelnen Arbeitssystemen zu verändern. Dadurch können bestimmte Zielwerte positiv beeinflusst werden, wobei andere Bewertungsgrößen leiden [JODL08], [NYHU12]. Allerdings weist das Beibehalten der natürlichen Reihenfolge (Fifo, d. h. first-in-first-out) hinsichtlich eines gemeinsamen Optimums die beste Zielerreichung auf [JODL08]. Insbesondere bei einem relativ hohen Umlaufbestand kommt es bei der Abfertigung an den einzelnen Arbeitssystemen zu verschärften Konkurrenzsituationen, weshalb eine unterschiedliche Priorisierung von Aufträgen im Produktionsablauf mitunter zu drastischen Abweichungen von der Fifo-Regel führt [BECH84]. Für die unterschiedlich priorisierten Auftragsgruppen resultiert infolgedessen ein divergentes Durchlaufverhalten.

Da eine Unterscheidung in Bearbeitungs- und Transportlosgrößen möglich ist, subsummiert das **Weitergabeprinzip** nachfolgend die Aspekte der Losgrößenkonstanz bei der Teileweitergabe (Teiledurchlauf bzw. Teilefluss [LÖDD08]), die Art der Auftragseinlastung sowie die resultierende Reihenfolgedisziplin. Infolgedessen beeinflusst sie unmittelbar die Kontinuität der Abarbeitung und indirekt die Proportionalität der Arbeitsinhalte an den einzelnen Arbeitssystemen [WOIT62]. Bei der Weitergabe der Arbeitsgegenstände sind folgende Ausprägungen denkbar [SCHM95], [SCHE14], [LÖDD08]:

- Reihenverlauf (Losfertigung, d. h. Auftragsmenge = Bearbeitungslosgröße = Transportlosgröße),
- Parallelverlauf (Einzelteilweitergabe, d. h. Losgröße = 1) oder
- kombinierter Verlauf (Auftragsmenge > Transportlosgröße).

Die Einzelteilweitergabe ist eine Extremform der Lossplittung, die beim kombinierten Verlauf (auch: überlappende Produktion [NYHU12]) vorliegt. Darüber hinaus kommt es insbesondere bei der Chargenfertigung (z. B. Wärmebehandlung) zur Zusammenfassung von Aufträgen für die Bearbeitung (Bearbeitungslosgröße > Auftragsmenge).

Die **Kapazitätssteuerung** repräsentiert die operative Ressourcenallokation und entscheidet somit kurzfristig über den konkreten Zeitpunkt des Einsatzes und die Zuordnung der Potenzialfaktoren zueinander [LÖDD08]. Dadurch werden die arbeitssystemspezifischen Belastungssituationen determiniert. In Abhängigkeit von der Auftragsfreigabe beeinflusst dies durch Festlegung des Einsatzes der technischen und personellen Potenzialfaktoren die resultierenden Abgänge der Aufträge von den Arbeitssystemen [LÖDD08]. Die räumliche und technologische Festlegung bzw. Verteilung von Arbeitsaufwänden impliziert die Arbeitsteilung und Arbeitsverteilung zwischen bzw. auf die einzelnen Ressourcenelemente [DITT81]. Die Kapazitätsabstimmung umfasst in diesem Zusammenhang ein umfangreiches Maßnahmenbündel zum Abgleich von Belastung- (Produktionsprogramm als nachfrageinduzierter Kapazitätsbedarf) und Kapazitätsprofil (vorhandener Kapazitätsbestand in Form der Systemzusammensetzung) sowie dessen jeweilige Anpassung (Abbildung 3-2, vgl. [WIEN97]). Insofern bedient sich die Kapazitätssteuerung der übrigen Stellgrößen (Auftragseinlastung, Reihenfolgebildung sowie Weitergabeprinzip) bzw. beeinflusst die Entscheidung über deren Ausprägung. Dabei sind die Maßnahmen der Kapazitätsanpassung eher langfristiger Natur (z. B. Fremdvergabe oder Neu-Investition) und daher der Kapazitätsplanung zuzuordnen. Dagegen findet der zeitliche, örtliche oder technologische Abgleich von Belastung und kapazitivem Bestand oft kurzfristig statt und definiert die eigentliche Kapazitätssteuerung. Gängige Verfahren streben in diesem Zuge entweder eine Leistungsmaximierung des Engpass-Arbeitssystems oder eine dezentrale bzw. produktionssystembezogene Bestands- oder Belastungsregelung an [LÖDD08].

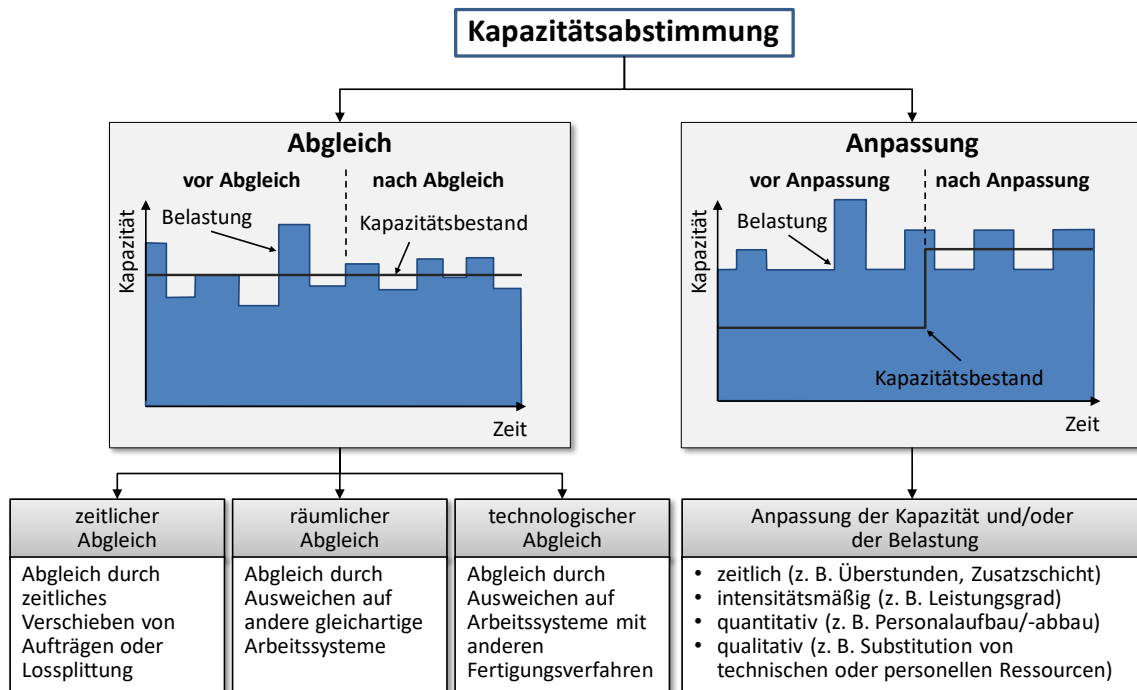


Abbildung 3-2: Maßnahmen der Kapazitätsabstimmung

Insbesondere die wechselnden Engpass-Arbeitssysteme, wie sie bei komplexen Produktionssystemen der variantenreichen Serienfertigung vorliegen, charakterisieren in grenzwertigen Belastungssituationen das Systemverhalten, da sie die Leistungsfähigkeit und damit die Ergebnisse des Gesamtsystems maßgeblich beeinflussen (vgl. [SCHO10], [WIND01], [ROSE02]). Je nach Zielgröße ist die Identifikation der jeweiligen Arbeitssysteme möglich, die für die ungewollte Abweichung verantwortlich sind (vgl. [WIND01]). Da im Rahmen dieser Arbeit die Gewährleistung einer definierten Funktionsfähigkeit im Mittelpunkt steht (Effektivität), liegt der Fokus auf dem durchsatzbestimmenden Engpass, der die Leistung des Produktionssystems insgesamt begrenzt.

Zumeist resultieren Engpässe aus einer Disproportionierung zwischen ressourcenorientiertem Kapazitätsangebot und nachfrageinduzierter Belastung [WIEN02b]. Zusätzlich können Disparitäten zwischen den qualitativen und quantitativen Personalkapazitäten einerseits und der technischen Ressourcenbasis andererseits die Engpasssituation verschärfen [KALU94], [SCHW90].

Die Engpassanalyse bedarf dabei stets einer dynamischen Betrachtung [SCHN04], [HOPP01]. Exemplarisch für das methodische Vorgehen zur Identifikation von Engpässen sei an dieser Stelle die Untersuchung mittels Active-Period-Method bzw. Average-Active-Period-Method angeführt (vertiefend [ROSE01], [ROSE02]).

Als Beschreibungsgrößen des Systemverhaltens dienen die Kontinuität des Teiledurchlaufs sowie die Proportionalität der Belastung der einzelnen Arbeitssysteme.

Die **Kontinuität** des Teiledurchlaufs als zeitliche Bindung des Produktionsflusses zwischen den einzelnen Arbeitssystemen wird zunächst durch die Ortsveränderlichkeit bzw. Beweglichkeit der Arbeitsgegenstände bestimmt. Ferner ergibt sie sich aus deren Verkettung und dem Weitergabeprinzip (Losgrößenkonstanz). Darüber hinaus hängt sie maßgeblich von dem zu bewältigenden Produktionsprogramm (insbesondere der Regelmäßigkeit der Auftragsfolge) sowie der Redundanz (Art und Anzahl gleichartiger Arbeitssysteme) ab.

Zu differenzieren sind folgende Ausprägungen [WIRT89]:

- keine Weitergabe, d. h. stationäre Produktion (Einzelplatz mit Werkbank- oder Baustellenprinzip)
- intermittierende/diskontinuierliche Weitergabe entweder
 - o unrythmisch (asynchron), d. h. ohne Taktung oder
 - o rhythmisch (synchron), d. h. mit Taktung
- kontinuierliche Weitergabe, d. h. stetige Bewegung des Arbeitsgegenstandes

Die **Proportionalität** bezeichnet die Gleichförmigkeit der arbeitssystemspezifischen Arbeitsaufwände ([WOIT62], vgl. Flussintensität [WIRT89]). Ähnlich wie die Kontinuität ergibt sie sich maßgeblich aus dem zu bewältigenden Produktionsprogramm mit seiner Teilevielfalt und Auftragsfolge sowie der Bewirtschaftung der vorhandenen Ressourcenbasis (Ressourcenallokation). Sobald unterschiedliche Produkte hergestellt werden (Teilevielfalt > 1), ist eine variierende Arbeitsgangfolge und eine gewisse Disproportionalität der Arbeitszeitaufwände in den einzelnen Arbeitssystemen wahrscheinlich [SCHU78]. Bei proportionaler Verteilung der Arbeitssystembelastungen ist eine Taktung möglich. Divergieren die Arbeitsaufwände jedoch zu sehr, sind Bestands- bzw. Bedarfspuffer zur Entkopplung der einzelnen Arbeitssysteme vorzusehen (vgl. Verkettung).

3.1.3 Stellgrößen der Produktionsstruktur

Abbildung 3-3 fasst nochmals alle Stellgrößen (schwarz) und Beschreibungsmerkmale (weiß) der Konfiguration von Produktionssystemen und angrenzender Aspekte zusammen.

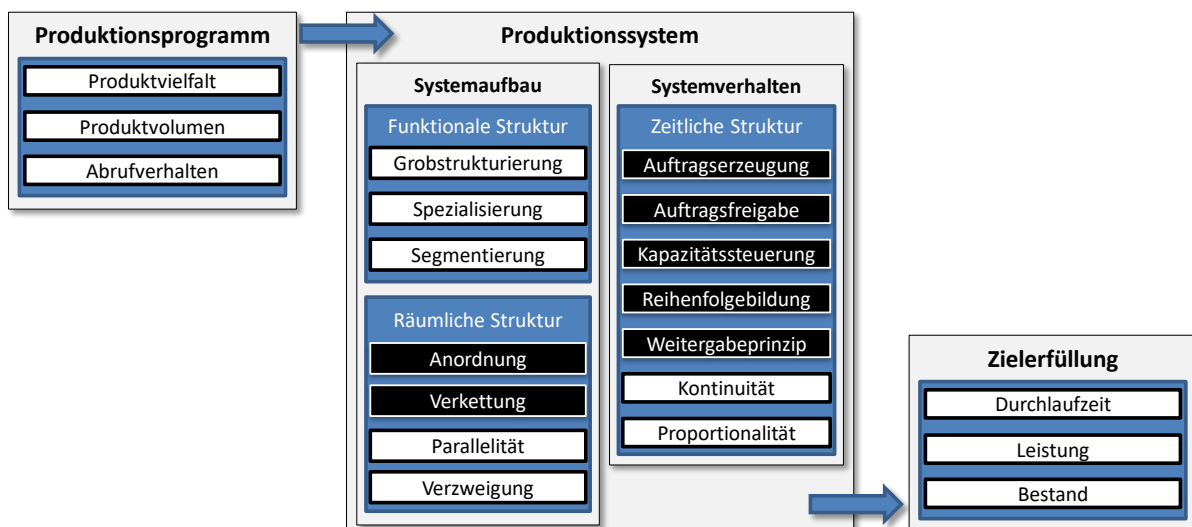


Abbildung 3-3: Konfigurationsparameter von Produktionsstrukturen

Hierbei wird evident, dass die Eingangs- (Produktionsprogramm) und Ergebnisgrößen (Zielgrößen) lediglich deskriptiven Charakter haben, da sie sich dem direkten Einflussbereich des Produktionssystems entziehen. Dies betrifft insofern auch die Zielerfüllung, als dass durch die Wahl der geeigneten strukturellen Konfiguration zwar auf ein geplantes Systemverhalten hingewirkt wird, die turbulenten Umfeldbedingungen und störungsbedingten Abweichungen jedoch nicht vollständig auszuschließen bzw. zu egalisieren sind. Vor diesem Hintergrund besitzt die Ablaufstruktur als maßgeblicher Stellhebel zum Abrufen des systemimmanenten Potenzials eine besondere Bedeutung.

Die Grundlage für eine weitergehende Systematisierung dieser Stellgrößen bildet der strategische Steuerungsraum [ZÜLC89], [ZÜLC90]. Dieser umfasst im Wesentlichen die Auftragserzeugung mit der Festlegung der Auftragsgröße, die Art der Freigabe bzw. Veranlassung sowie die Reihenfolgebildung.

Die explizite Vernachlässigung der Kapazitätssteuerung beruht darauf, dass die Kombinatorik der übrigen drei Stellgrößen die kapazitiven Eingriffe annahmegemäß bereits vollständig abbildet (vgl. [HEIN16], [MÖSS99]).

Dagegen berücksichtigt der Ansatz von Lödding [LÖDD08] die Kapazitätssteuerung zwar explizit, dient dennoch eher der Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zudem tragen beide Konzepte der gestalterischen Variation des Weitergabepinzips nur unzureichend Rechnung. Bei Hinzuziehen der langfristigen Kapazitätsabstimmung zum Bündel der Stellgrößen des Systemverhaltens ergeben sich die in Abbildung 3-4 veranschaulichten Strategien (vgl. [WIEN97], [MÖSS99]).

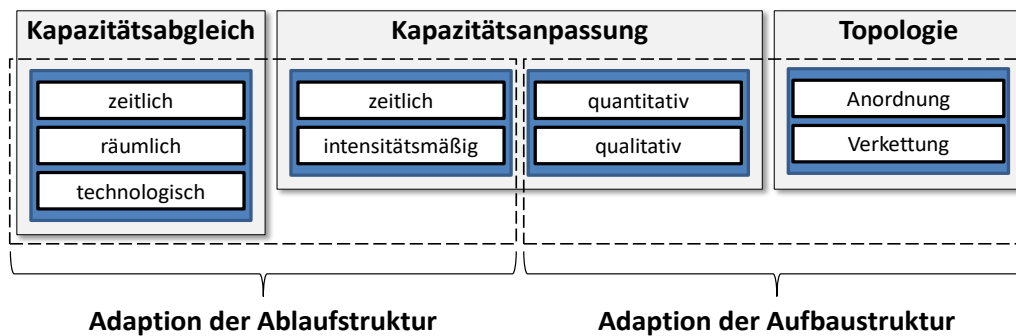


Abbildung 3-4: Stellhebel zur Strukturadaption

In diesem Zusammenhang führt die quantitative oder qualitative Anpassung des vorhandenen Kapazitätsbestandes stets zu einer Veränderung der Systemzusammensetzung bezüglich der Menge bzw. Art der Ressourcenelemente und wirkt sich somit direkt auf die Aufbaustruktur aus. Darüber hinaus resultiert eine modifizierte Anordnung in einer Adaption des Systemaufbaus. Gleiches gilt für die Änderung der Verkettung einzelner Arbeitssysteme.

Hingegen beeinflusst eine zeitliche oder intensitätsmäßige Kapazitätsanpassung lediglich die Dynamik des Produktionsprozesses, indem der Nutzungszeitraum der Ressourcen (z. B. Überstunden, Zusatzschichten, Kurzarbeit) oder die Geschwindigkeit der Leistungserstellung (Änderung des Wirkungsgrades der Potenzialfaktoren durch veränderten Leistungsgrad) geändert wird. Ebenso stellt der Kapazitätsabgleich durch Verlagerung von Aufträgen oder sogar einzelner Arbeitsvorgänge eine direkte Adaption der Ablaufstruktur dar.

3.2 Kennzahlen zur Bewertung von Produktionsstrukturen

Gestaltungsansätzen zur Vorausbestimmung veränderungsfähiger Systemstrukturen stehen im Zuge der Fabrik- und Produktionsstrukturplanung analytischen Ansätzen zur Überprüfung bzw. Bewertung einer installierten Systemstruktur gegenüber. Zur Beurteilung von Produktionsstrukturen bedarf es entsprechender Kenngrößen, die eine Einschätzung der relevanten Aspekte erlauben. Dazu dienen auf Grund ihres objektiven, reproduzierbaren Charakters Kennzahlen bzw. Kennziffern oder Messgrößen. Dabei handelt es sich um Zahlenwerte, die Informationen zu einem komplexen Zusammenhang in komprimierter, quantitativer Form darstellen [WÖHE13]. Allgemein werden sie zur Ermittlung des derzeitigen Zustandes eines Betrachtungsobjektes oder zum Vergleich mit früheren Ausprägungen (Zeitvergleich) bzw. Planwerten (Soll-Ist-Vergleich) herangezogen [HORV11]. Kennzahlen sind daher als Mittel zur Bewertung von Produktionsstrukturen und ihrer Eigenschaften prädestiniert. In Beziehung stehende Kennwerte lassen sich in Form eines Kennzahlensystems darstellen, welches als Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung, zur Analyse betrieblicher Strukturen und zur Überwachung

der Leistungserstellungsprozesse dient und zumeist im Rahmen eines spezifischen Regelkreises Anwendung findet [HORV11]. Die möglichen Ausprägungen betrieblicher Kennzahlensysteme sind Tabelle 3-2 (vgl. [WÖHE13], [HORV11]) zu entnehmen.

Tabelle 3-2: Ausprägungen von Kennzahlensystemen

Merkmals	Ausprägungen		
Bezug	Absolute Zahlen		Verhältniszahlen
Zeitliche Struktur	Zeitpunkt		Zeitraum
Zeitbezug	Ergebnisse	Zustände	Entwicklungen
Inhaltliche Struktur	Wertgrößen		Mengengrößen
Verknüpfung	Ordnungssystem		Rechensystem

Üblicherweise finden Verhältniskennzahlen Verwendung, die die Relation von in einem sachlogischen Zusammenhang stehenden Größen wiedergeben. Darunter fallen [HORV11]:

- Gliederungszahlen: Verhältnis einer Teil- zur übergeordneten Gesamtgröße,
- Beziehungszahlen: Zuordnung und Relation zweier unterschiedlicher Merkmale sowie
- Indexzahlen: zeitlicher Vergleich gleichartiger Merkmale.

Im Fabrikbetrieb können nebeneinander sowohl zeitpunkt- als auch zeitraumbezogene Kennwerte generiert werden (vgl. [BJOR95]). Ebenso verhält es sich mit dem Zeitbezug. Somit ist es möglich, Ergebnisse (retrospektive Erfolgsmessung) für eine Betrachtungsperiode zu bewerten, Zustände zu bestimmten Zeitpunkten zu erfassen und Entwicklungen (prospektive Erfolgsabschätzung) zu prognostizieren. Um Veränderungen im Zeitverlauf zu erfassen, kommen zeitpunkt-, intervallbezogene oder kontinuierliche Kenngrößen in Frage. Dabei sind die ersten beiden Maßzahlen insofern kritisch, weil ihr Aussagegehalt maßgeblich von der Wahl der korrekten zeitlichen Bezugsbasis abhängt. Dieses Defizit kann durch kontinuierliche Erfassung der entsprechenden Beurteilungsgrößen umgangen werden, weil dadurch die Dynamik der Veränderungen ersichtlich wird.

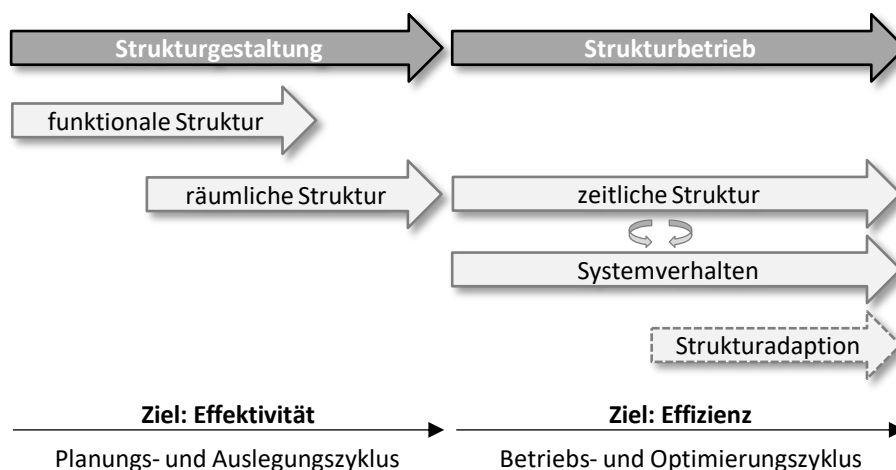


Abbildung 3-5: Unterschiedliche Aspekte der Bewertung von Produktionsstrukturen

Zusätzlich erfolgt eine Differenzierung von Kennzahlensystemen in Rechen- und Ordnungssysteme. Erstere sind dabei hierarchisch aufgebaut und über mathematische Zusammenhänge miteinander verknüpft.

Die Beurteilung des Leistungserstellungsprozesses als Indikator für die Vorteilhaftigkeit der zugrundeliegenden Produktionsstruktur setzt eine Messung relevanter Informationen voraus, an die einige grundsätzliche Anforderungen gestellt werden [ARIC14]:

- Validität (Richtigkeit und Aktualität),
- Verfügbarkeit und Zugänglichkeit sowie
- Verständlichkeit und Eindeutigkeit.

Bei phasenbezogener Betrachtung des Produktionssystems verschiebt sich das Hauptaugenmerk des betrieblichen Interesses während der Planung von der funktionalen über die räumliche und zeitliche Struktur zunehmend hin zum Systemverhalten und erforderlichen strukturellen Anpassungen im Betriebs- und Optimierungszyklus (Strukturadaption) (Abbildung 3-5).

Um eine Einschätzung der Qualität einer Produktionsstruktur in Bezug auf eine zu bewältigende Aufgabe (Produktionsprogramm) vornehmen zu können, sind die positiven und negativen Aspekte der konkreten Konfiguration vor dem Hintergrund der betrieblichen Ziele zu analysieren. Dabei lassen sich grundsätzlich Vorteile und Nachteile bzw. Nutzen und Aufwand differenzieren. Die Bewertung des Grades der Zweckerfüllung eines Systems erfolgt in der Planungsphase vordergründig anhand des Outputs, was grundsätzlich der betrieblichen Zielerreichung (Effektivität als Sachziel) entspricht. Dennoch bestimmt das gewählte Strukturkonzept bereits den entstehenden Aufwand im späteren Betriebszyklus. Darin wird das Systemverhalten über die Nutzung des vorhandenen strukturimmanenten Potentials zur Überführung bestimmter Eingangsgrößen in definierte Ausgangsgrößen charakterisiert. Dabei stellen die laufenden Kosten, die im Zuge der Leistungserstellung anfallen, den maßgeblichen Bewertungsgegenstand dar. Im Strukturbetrieb wird daher zusätzlich die Höhe nicht-monetärer Nutzenbeiträge unter Effizienzgesichtspunkten eng kontrolliert.

Vor diesem Hintergrund werden im Fortgang die zuvor identifizierten Merkmale der unterschiedlichen Betrachtungsbereiche in Kennzahlen überführt und die Eignung dieser Bemessungsgrößen zur Analyse und Bewertung des jeweiligen Nutzenbeitrags bzw. Aufwands von Produktionssystemstrukturen geprüft.

3.2.1 Bewertung der Aufbaustruktur

Die Aufbaustruktur, die die Aspekte der Systemzusammensetzung (funktionale Struktur) und der Topologie der ortsfesten Ressourcenelemente (räumlich Struktur) subsummiert, stellt die Voraussetzung für den späteren Strukturbetrieb dar. Deshalb besteht ihr Nutzen vornehmlich in der Bereitstellung einer funktionsfähigen Systemkonfiguration, deren Qualität sich letztlich erst in der Betriebsphase zeigt.

Die organisatorische Arbeitsteilung zwischen einzelnen Produktionssystemen innerhalb einer Fabrik ist in der Praxis eine planerische (Neuplanung) oder strategische Festlegung (Umplanung). Eine Beurteilung der Güte dieser Entscheidung findet in der Regel nicht statt [KUPR91]. Vielmehr sorgen die im Planungsstadium verwendeten methodischen Ansätze für eine zweckmäßige Bildung von Organisationseinheiten. Während des Betriebszyklus kann es durch Produktwechsel oder Veränderungen des Produktionsprogramms allerdings zu signifikanten Verschiebungen kommen, die die Vorteilhaftigkeit der planerischen Lösung wiederum in Frage stellen [HEIN16].

Die **funktionale Struktur** und die Bewertung ihrer Eignung zur Erreichung der betrieblichen Zielstellungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit daher vor dem Hintergrund der passenden vertikalen Spezialisierung einzelner Leistungseinheiten. Dabei steht die adäquate Bildung von Teilefamilien im Mittelpunkt. Die Zuordnung von Produktgruppen zu als organisatorische Einheiten aufgefassten Produktionssystemen definiert maßgeblich die Homogenität bzw. Heterogenität der notwendigen technologischen Abläufe. Diese Kausalität beruht auf dem Planungsgrundsatz, ausgehend vom Produkt und möglichen Zwischenzuständen die passenden Prozesse abzuleiten [GRUN12].

Zu diesem Zweck sind die Leistungsanforderungen an das Produktionssystem hinsichtlich der Vielfalt und des Mengengerüsts des Produktspektrums aus dem Produktionsprogramm zu ermitteln. Hierfür bieten sich die Werkzeuge der gruppentechnologischen Klassifikation an (vgl. [SOKO38], [MITR60], [WIRT89], [HELB10], [SCHI89], [SCHU78], [WOIT62]), da sie die aus der konstruktiven Ähnlichkeit der Erzeugnisse resultierenden Arbeitsfolgen und Bearbeitungsaufwände unter Berücksichtigung des Produktionsvolumens einbeziehen und das Teilesortiment in Form von belastungsbezogenen Ablauffamilien kategorisieren. Diese Vorgehensweise ist eng mit der Segmentierung des Produktionssystems in Organisationseinheiten verknüpft [WILD89]. Die produktbezogene Gleichartigkeit des technologischen Ablaufes sowie der konstruktiven Ähnlichkeit kann je nach methodischer Grundlage der Bildung von Teilefamilien variieren [MART89]. Nachfolgend sind die wesentlichen Ansätze mit Verweis auf vertiefende Literatur aufgeführt:

- Gestaltfamilie: Gruppen von Teilen, die bezüglich ihrer geometrischen Gestalt ähnlich sind [OPIT66], [HAHN70]
- Fertigungsfamilien: Gruppen von Teilen, die bezüglich fertigungstechnischer Anforderungen gleich oder ähnlich sind [LUEG75], [TUFF88]
- Fertigungsablauffamilie: Gruppen von Teilen, die bezüglich ihrer fertigungstechnischen Anforderungen und der Arbeitsvorgangsfolge ähnlich sind [HELB10], [WIRT89], [SCHI89], [BURB71], [BURK84], [ELES71]

Exemplarisch sei an dieser Stelle die Prozesskommunalität als aggregierte Maßzahl für die Bewertung der Ablaufähnlichkeit erwähnt (vgl. [NUSS11], [BREC11], [BORN09]). Sie beschreibt im Wesentlichen das Verhältnis der minimalen zur tatsächlichen Anzahl an Materialflussbeziehungen zwischen den Arbeitsmitteln bei gegebener Ressourcenzahl [BOHL14]. Eine Vielzahl weiterer Beschreibungsgrößen finden sich bei Wirth [WIRT89] und Helbing [HELB10], die sich jeweils mit der Vereinheitlichung von Produkten zu Teilefamilien auf Basis der technologischen Prozessparameter befassen.

Die **räumliche Struktur** einer Organisationseinheit wird maßgeblich durch die Anordnung der ortsgebundenen Ressourcenelemente, i. d. R. die Arbeitsmittel, bzw. Arbeitsplätze bei Beachtung der sich daraus ergebenden Ortsveränderungen der Arbeitsgegenstände und Arbeitskräfte sowie deren Einbindung in die bauliche Hülle definiert [KETT84]. Die Topologie resultiert zumeist aus den zwischen den ortsfesten technischen Ressourcen bestehenden Materialflussbeziehungen. Alternative Anordnungskriterien sind allerdings durchaus denkbar (vgl. [BERG08]). Die räumliche Strukturierung eines Produktionssystems erfolgt oft nicht nach nur einem Strukturierungskriterium. Vielmehr ist sie das Resultat von verschiedenen, hierarchisch organisierten Anordnungskonzepten, welche sich überlagern. Für die Anordnungsoptimierung existieren zahlreiche deterministische und heuristische Verfahren [GRUN12], [AGGT90], [SCHM95]. Dennoch steht die Verknüpfung der einzelnen Arbeitsmittel über den auftragsbezogenen mittleren Teiledurchlauf zumeist im Fokus der Betrachtung [GRUN12], [AGGT90]. Daher existiert eine Vielzahl von Indikatoren, die die Materialflussverflechtungen als Ursprung einer abgeleiteten räumlichen Strukturlösung adäquat abbilden.

Das Grundproblem der räumlichen Strukturierung liegt dabei in der örtlichen Zusammenführung der an einem Teilprozess beteiligten Elemente [SCHM70]. Durch Dekomposition entstehen folgende drei Teilaufgaben:

- Festlegung, welche Elemente einen festen Standort erhalten und welche Elemente bewegt werden, d. h. Ermittlung der Ortsveränderlichkeit der Arbeitsmittel bzw. Arbeitsgegenstände,
- Bestimmung des Standorts der ortsfesten Elemente und
- Definition der Bewegungsrouten der ortsveränderlichen Elemente.

Die Komplexität des räumlichen Aspektes der Produktionsstruktur einer betrieblichen Leistungseinheit hinsichtlich ihres internen Materialflusses setzt sich aus der Konnektivität (Beziehungsvielfalt, d. h.

zweistelligen Relationen zwischen den Systemelementen) und der Varietät (Elementvielfalt, d. h. Art und jeweilige Anzahl der Systemelemente) zusammen [KOB00], [LÜCK99]. Die räumliche Struktur wird dabei durch das durchschnittliche (prognostizierte) Produktionsprogramm bestimmt und basiert auf der Ermittlung der passenden Systemzusammensetzung. Die physischen Verbindungen zwischen den einzelnen ortsgebundenen Arbeitsplätzen werden über den Materialfluss in Folge des Teile- bzw. Auftragsdurchlaufs repräsentiert. Somit sind die zwei wesentlichen Indikatoren, die die topografische Anordnung der Ressourcen – neben ihrer Art und Anzahl (Systemzusammensetzung) – definieren, die Anzahl der Verknüpfungen zwischen ihnen und die Richtung der Relationen. Diese charakterisierenden Kenngrößen finden sich in der Materialflussmatrix wieder, die das Beziehungsgeflecht zwischen den Arbeitsplätzen sowie die jeweilige Intensität und Richtung der Verbindung (statisch) abbildet.

Damit ist gleichzeitig der maßgebliche Aufwand definiert, der sich aus den Transport- und ortsabhängigen Installationskosten ergibt (vgl. [GRUN12], [AGGT90], [KETT84]). Erstere ergeben sich aus den Bewegungsrouten der ortsveränderlichen Elemente, welche wiederum durch die Standortverteilung der Arbeitsplätze bedingt sind, und der Auswahl sowie Anzahl der Transportmittel. Die Installationskosten resultieren aus der Entscheidung, wo die ortsfesten Ressourcen aufgestellt werden.

Die Aufbaustruktur stellt eine notwendige Voraussetzung für das spätere Betreiben dar, weshalb ausschließlich Aufwände zur Bereitstellung dieses Aspektes des Produktionssystems entstehen. Der Nutzen des Systemaufbaus zeigt sich somit erst im späteren Verhalten. Da der einzige Nutzenbeitrag in der Realisierung des planerischen Produktionsprogramms als grundsätzliche Anforderung liegt, wird den im Betrieb anfallenden Transportkosten bereits im Planungsstadium über die Minimierung der maßgeblich kostenverursachenden Transportleistung des räumlichen Strukturkonzepts Rechnung getragen [GRUN12].

Tabelle 3-3: Systematisierung von räumlichen Strukturkennzahlen

Zielrichtung der Kennzahlen	Kennzahlen zur Strukturbewertung	Autoren
Maximierung der inneren Beziehungsintensität	Teilbereichsbedeutungsgrad	Burkhardt
	Teilbereichskontaktgrad	Burkhardt
	Intensitätsgrad	Förster
	Besetzungsdichte	Martin
	Wechselbeziehungsgrad	Martin
	Mittlere Beziehungshäufigkeit	Martin
	Strukturgeschlossenheit	Martin
	Desintegrationsgrad	Sainis
	Ähnlichkeitsgrad	Schmigalla
	Geschlossenheitsgrad	Schmigalla
Innerer Kooperationsgrad	Schmigalla	
Minimierung der äußeren Beziehungsintensität	Linienbeziehungsverhalten	Burkhardt
	Teilbereichsverknüpfungsgrad	Burkhardt
	Äußerer Kooperationsgrad	Schmigalla
Maximierung der Arbeitsmittelauslastung	Linienbelegungsverhalten	Burkhardt
	Mittlere Fertigungsbereichsauslastung	Burkhardt
	Betriebsmittelauslastung	Scharf
Erhöhung der Richtungsgebundenheit	Richtungskoeffizient	Büchel
	Strukturlinearität	Martin

Zur weiteren Charakterisierung der Aufbaustruktur existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Kenngrößen (vgl. [MART89], [BURK84], [SCHA75], [SCHM70], [SAIN75], [FÖRS83], [BÜCH68]), die auf den drei

maßgeblichen Bestimmungsgrößen (Anzahl unterschiedlicher Ressourcen/Arbeitsplätze, Anzahl sowie Richtung der Verbindungen und ihre jeweilige Intensität) basieren (Tabelle 3-3). Diese sind statische Indikatoren, die einen bestimmten planerischen Zustand repräsentieren.

Je nach Zielrichtung der Kenngrößen steht die Maximierung der inneren bzw. Minimierung der äußeren Beziehungsintensitäten (Konnektivität) im Fokus. Neben teilweise geringfügigen Abweichungen in den Berechnungsvorschriften werden im Folgenden die wesentlichen Maßzahlen vorgestellt. Mit dem Kooperationsgrad κ [SCHM95], [SCHM70] wird die mittlere Anzahl von Struktureinheiten bezeichnet, mit denen eine Struktureinheit (ausgeschlossen Wareneingangs-, Zwischen- oder Warenausgangslager) aufgrund des Produktionsdurchlaufs unmittelbar verbunden ist [ACKE07]. Der Intensitätsgrad η [FÖRS83] beschreibt die durchschnittliche relative Materialflussintensität, die über eine Struktureinheit fließt [ACKE07]. Mit beiden Bestimmungsgrößen kann eine prinzipielle Eingrenzung von räumlichen Strukturtypen vorgenommen werden [ACKE07], [SCHM95]. Auch der Desintegrationsgrad [SAIN75] stellt ein Maß für die Vernetzung der einzelnen Systemelemente untereinander dar. Er nimmt den Wert 1 bei einer vollständig vermaschten Struktur an, bei der alle ortsfesten Ressourcen wechselseitig miteinander in Beziehung stehen, und beträgt $1/m$ (m – Anzahl der Elemente), bei einer reihenförmigen Anordnung ohne jegliche Rückflüsse.

Die Kenngrößen zur Minimierung der äußeren Beziehungsintensitäten betreffen die Konnektivität zwischen unterschiedlichen Leistungseinheiten. Neben der reinen booleschen Materialflussverknüpfung steht mit Hinblick auf den späteren Strukturbetrieb auch die Erhöhung der Betriebsmittelauslastung im Mittelpunkt der planerischen Überlegungen. Dazu werden auf Basis von Arbeitsplandaten voraussichtliche Belegungszeiten abgeleitet.

Darüber hinaus stehen mitunter die Richtungsgebundenheit der Struktur bzw. der lineare Charakter (Gradlinigkeit) ihrer Topologie im Vordergrund des Interesses. Die Strukturlinearität [MART89] stellt das Verhältnis zwischen der Anzahl der Verbindungen in Hauptmaterialflussrichtung zur Gesamtverbindungsanzahl dar. Dem zu Grunde liegt eine vorflussoptimierte Materialflussmatrix, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Summe der Einträge der oberen Dreiecksmatrix, d. h. oberhalb der Diagonalen (vgl. [SCHM70]), ihr Maximum hat. Ausgehend von der impliziten Reihenfolge der Ressourcen, die sich in ihrer zeilen- bzw. spaltenweisen Rangfolge in der booleschen Matrix der Transportverbindungen wiederfindet, entsprechen alle oberhalb der Diagonalen vorkommenden Elemente einer Vorwärtsbewegung. Analog dazu drücken alle Einträge unterhalb der Diagonalen Bewegungen entgegen der definierten Materialflussrichtung aus. Für eine vollständig vernetzte Aufbaustruktur (Netz) ergibt sich somit ein Wert von 0,5, während eine rein vorwärts gerichtete, gradlinige Struktur den Wert 1 aufweist. Der Richtungskoeffizient [BÜCH68] ist eine Verhältniskennzahl, die ebenfalls der Charakterisierung einer bevorzugten Materialflussrichtung dient. Dazu wird die Summe aller Elemente oberhalb der Diagonale der Materialflussmatrix abzüglich der Summe aller unteren Matrix-Elemente mit der Gesamtzahl aller Elemente ins Verhältnis gesetzt. Daher ergibt sich ein Maximalwert von 1 bei Gradlinigkeit der Topologie, d. h. sofern keinerlei Rückflüsse vorliegen, und ein rechnerisches Minimum von 0, wenn ebenso viele Verbindungen in wie entgegen der vorgegebenen Materialflussrichtung vorliegen.

3.2.2 Bewertung der Ablaufstruktur

Die Bewertung der Ablaufstruktur ist eng mit dem gezeigten Systemverhalten verknüpft. Dabei hängt die zeitliche Strukturlösung maßgeblich von der installierten Aufbaustruktur ab, weist allerdings davon unabhängige Parameter auf, die wiederum für die Erreichung der gesetzten Ziele entscheidend sind.

Die Berücksichtigung des Arbeitsablaufs, d. h. der logischen und zeitlichen Verknüpfung der Teilaufgaben einer Arbeitsaufgabe, erfolgt durch die **zeitliche Struktur** [KETT84], [BULL86]. Die Folge von Relationen zwischen den Systemelementen bringt die zeitliche Komponente der im Produktionssystem ablaufenden Prozesse zum Ausdruck [WIRT89].

Im Rahmen der Auftragserzeugung wird bereits versucht, durch die Wahl wirtschaftlicher Fertigungsauftragsgrößen die Summe aus Lagerhaltungs- und Rüstkosten zu reduzieren [JODL08], [LÖDD08], [MÖSS99], um so bereits prospektiv die Leistungserstellungskosten zu begrenzen.

Während des Strukturbetriebs tragen hinsichtlich der planerischen Aktivitäten die Menge herzustellender Produktarten, die Anzahl der Kapazitätseinheiten und die Anzahl zu fertigender Aufträge in einer Periode zum komplexen Charakter eines Produktionssystems bei [BORN09]. Im Rahmen der Produktionssteuerung bestimmen die Vernetzung der einzelnen Kapazitätseinheiten über den Materialfluss sowie seine Richtungsgebundenheit bzw. die Anzahl von rekursiven Schleifen (z. B. in Folge von Nacharbeit) den Aufwand (vgl. [BORN09]). Unabhängig von der Komplexität des Produktionssystems verursacht auch die Auswahl des Steuerungsverfahrens (Kanban, Belastungsorientierte Auftragsfreigabe, MRP usw.) auf Grund des unterschiedlichen Informationsbedarfs samt Erfassung und Verarbeitung von auftragsbezogenen Daten Kosten [MÖSS99]. All diese Aspekte finden sich schließlich implizit in den Fertigungsgemein- oder Verwaltungskosten wieder, ohne dass eine weitere Spezifizierung erfolgt. Es wird daher zumeist versucht, diese größtenteils produktspezifischen Aufwände durch Rationalisierungsmaßnahmen und Ansätze des Lean-Managements sukzessive zu reduzieren (vgl. [OHNO09]).

Quantitative Maßzahlen für die Ablaufstruktur sind ihrer Natur nach entweder dynamische Größen, die ihre Aussagekraft über eine Entwicklung im Zeitverlauf gewinnen, oder Zustandswerte, die über die retrospektive Betrachtung eines definierten Zeitraums ermittelt werden.

Allgemeine Kenngrößen der systembezogenen zeitlichen Struktur sind demzufolge Mittelwert, Streuung und Spannweite der Intensität des Teiledurchlaufs [WIRT89]. Diese Lage- und Streumaße beziehen sich konkret auf die Amplitude der arbeitsvorratsbezogenen Systembelastung. Die Regelmäßigkeit des Intensitätsaufkommens kann mittels einer an die XYZ-Analyse (vgl. [SCHE14]) angelehnten Kategorisierung anhand des belastungsorientierten Variationskoeffizienten erfolgen. Dabei wird auf die relative Streuung der einzelnen Belastungsspitzen um deren Mittelwert (ggf. Planwert) zurückgegriffen (vgl. Schwankungskoeffizient nach [HART02]). Dies ermöglicht die Konzentration des Bedarfs- bzw. Einlastungsverlaufs samt vorhandener Schwankungen in einer einzelnen Maßzahl. Dadurch werden unterschiedliche zeit- und mengenmäßige Verlaufsformen vergleichbar. Die Definition der Grenzen zwischen den drei Kategorien erfolgt in der Regel betriebsspezifisch und hängt bei Nutzung des Schwankungskoeffizienten zusätzlich von der Güte der Planwerte ab.

Auf Basis der Kontinuität und der Intensitäten der Beziehungen zwischen den Systemelementen als dynamische Größen werden unterschiedliche zeitliche Verläufe charakterisiert (Abbildung 3-6).

Die qualitative Kategorisierung der Verlaufsformen eines Arbeitssystems unterscheidet in gleichmäßig bzw. ungleichmäßig sowie kontinuierlich bzw. diskontinuierlich mit der Unterteilung in rhythmisch und unrhythmisch [WIRT89]. Charakterisierend für den zeitlichen Verlauf sind in diesem Zusammenhang zum einen die Gleichmäßigkeit der Amplitudenhöhe (gleichförmig-diskontinuierlich), die Freiheit von Intensitätsunterbrechungen (kontinuierlich) sowie die Gleichförmigkeit des Rhythmus der auftretenden Intensität (rhythmisch), d. h. der Zyklus der Intensitätsamplituden. Damit sind Aussagen zur Kontinuität und bei Vergleich unterschiedlicher Arbeitssysteme zusätzlich zur Proportionalität der Belastung möglich. Andererseits lässt sich die zeitliche Struktur von Operationsfolgen qualitativ auch durch die Art des Teiledurchlaufs (Parallelverlauf, Reihenverlauf, kombinierter Verlauf) beschreiben und bezieht sich damit auf das Verhältnis von Transport- zur Bearbeitungslosgröße [SCHM95].

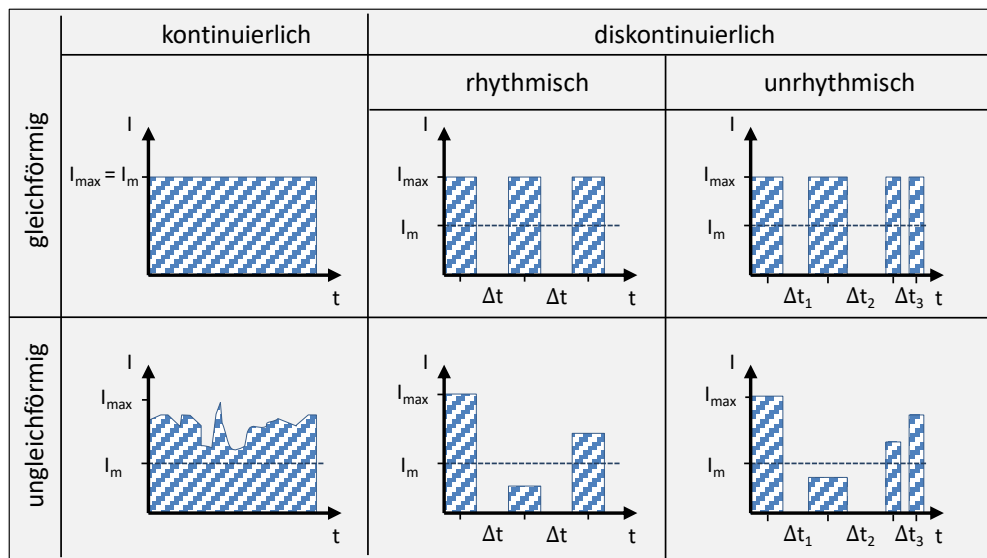


Abbildung 3-6: Formen des Intensitätsverlaufs [WIRT89]

Die Indikatoren der zeitlichen Struktur beschränken sich mehrheitlich auf eine Beschreibung des Ablaufs bzw. des Verlaufs der Materialflussintensitäten (Tabelle 3-4). Hierbei liegt folglich das deskriptive Ziel der Maßzahl im Fokus. Dennoch wird planerisch grundsätzlich eine gleichmäßige (kontinuierlich- oder rhythmisch-gleichförmige) Einlastung angestrebt [GRUN12], die die zur Verfügung stehende Kapazität des Produktionssystems berücksichtigt [LÖDD08]. Dies entspricht der Idealvorstellung des Kundenverhaltens mit periodisch-gleichen Bedarfen (vgl. Kundentakt [OHNO09]).

Tabelle 3-4: Systematisierung von zeitlichen Strukturkennzahlen

Zielrichtung der Kennzahlen	Kennzahlen zur Strukturbewertung	Autoren
Synchronizität	Logistische Synchronisation (Unternehmensebene)	Chankow
	Logistische Synchronisation (Arbeitssystemebene)	Chankow
	Physische Synchronisation (intern)	Chankow
	Physische Synchronisation (extern)	Chankow
Proportionalität der Arbeitssystembelastungen	Übergangswahrscheinlichkeiten Materialflusskoeffizient	Breithaupt Schneider
Bewertung der Auftragsituation	Auftragsdichte Mittlere Losgröße	Burkhardt Burkhardt
Anteil wertschöpfender Tätigkeiten	Nutzgrad	Kletti
	Beleggrad	Kletti
	Bearbeitungsgrad	Kletti
	Innerzyklische Parallelität/Flussgrad	Wirth

Mit Blick auf die zeitliche Struktur erscheint die Synchronizität der Prozessabläufe ein aussagekräftiger Indikator zu sein [CHAN16], [CHAN14]. Dabei bezieht sich die logistische Synchronisation auf die zeitliche Kopplung bzw. Aufeinanderfolge der Ausprägung charakteristischer Kenngrößen (z. B. Bestand) bei per Materialfluss verbundenen Arbeitssystemen. Bei der notwendigen Korrelationsanalyse werden unabhängig vom Untersuchungsfokus (Unternehmens- oder Arbeitssystemebene) nichtlineare Wechselwirkungen jedoch nur unzureichend berücksichtigt (vgl. [CHAN16]). Die physische Synchronisation

ist hingegen ein Maß für den Rhythmus simultaner Abläufe und für bestimmte zeitliche Verhaltensmuster der Herstellprozesse bezüglich definierter Ereignisse. Hierbei ermöglicht die externe Betrachtung die Berücksichtigung eines Einlastungstaktes. Alle vier Kenngrößen bedürfen einer umfangreichen nachträglichen Datenanalyse und rechentechnischen Auswertung.

Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Arbeitssystemen können mit Hilfe der Materialflussmatrix ermittelt werden (vgl. [WIEN99]). Durch Normierung der Materialflussintensitäten mit der Zeilensumme (Spaltensumme) der Intensität des abgebenden (aufnehmenden) Arbeitssystems resultiert ein relationsbezogenes Maß für die mittlere Wahrscheinlichkeit des Auftragsübergangs zwischen beiden Systemen. Die derart ermittelten Kennzahlen gleichen dem von Schneider definierten Materialflusskoeffizienten [SCHN04] sowie dem Intensitätsgrad nach Förster [FÖRS83]. Es wird dabei jeweils der relative Anteil des betrachteten Arbeitssystems am stückzahl- bzw. auftragsanzahlorientierten Materialfluss der gesamten Leistungseinheit berechnet. Dies entspricht dem Anteil an der gesamtsystemischen Belastung (Zugang), der an einem bestimmten Arbeitssystem anfällt. Insbesondere bei komplexen Materialflussgeflechten mit Rückflüssen ist eine exakte und aussagekräftige Zugangswahrscheinlichkeit auf Grund der resultierenden zyklischen Betrachtung jedoch nicht zu ermitteln. Die (zugangsbasierten) Belastungs- und (abgangsbasierten) Leistungsstreuungen der einzelnen Subsysteme lassen sich darüber hinaus durch die Streuung der Ausführungszeiten hinreichend genau beschreiben (vgl. [KENN15], [EICK09]). Dadurch lässt sich auf die Bestandstreuungen des jeweiligen Arbeitssystems schließen. Diese stellen einen Anhaltspunkt für die Kontinuität des Produktionsflusses dar und geben gleichsam indirekt Aufschluss über die zeitliche Bindung des Teiledurchlaufs.

Andererseits findet die Spezifik der Ablaufstruktur häufig implizit in Größen zur Beschreibung der Fertigungsaufgabe bzw. Bewertung der Auftragsituation Beachtung (z. B. mittlere Losgröße oder Auftragsdichte [BURK84]).

Weiterhin kann die zeitliche Struktur durch die innerzyklische Parallelität beschrieben werden [WIRT89]. Letztere, auch Flussgrad genannte Größe, spiegelt retrospektiv das auftragsbezogene Verhältnis der Summe der Betriebsmittelbelegungszeiten zur Durchlaufzeit wider [KLAU04] und entspricht dem Beleggrad [KLET07]. Sie eignet sich damit als Maßzahl zum Vergleich von Aufträgen mit heterogenen Bearbeitungszeiten hinsichtlich ihres Durchlaufverhaltens [SCHE14]. Zudem kann die Verwendung des Flussgrades als Vergangenheitsmaß für den produktiven Zeitanteil der Durchlaufzeit erfolgen. Das damit abgebildete Verhältnis zwischen Belegungs- bzw. Durchführungszeit und Durchlaufzeit gibt Aufschluss darüber, wie groß der mittlere Transport- und Liegezeitanteil der Aufträge ist. Damit stellt es einen Indikator für das Maß der Prozessverkettung und auf Grund der ggf. bestehenden Puffer auch für die Höhe der Umlaufbestände dar [KLET07]. Der Nutzgrad als Quotient der summarischen Bearbeitungszeiten und der Gesamt-Durchlaufzeit spiegelt wiederum die Prozessfähigkeit der eingesetzten Technologien wider [KLET06], [KLET07]. Als Indikator für die Prozesssicherheit dient der Bearbeitungsgrad, der sich aus dem Verhältnis der Hauptnutzungszeit (Bearbeitungszeit) zur Durchführungszeit ergibt [KLET07].

3.2.3 Bewertung des Systemverhaltens

Die Beurteilung der Güte eines Strukturkonzeptes bezieht sich nicht nur auf seine strukturellen (funktionalen, räumlichen und zeitlichen) Ausprägungen, sondern ist letztlich erst anhand des Systemverhaltens abschließend möglich, da nur so die Dynamik des Transformationsprozesses und somit die Wertschöpfung der Eingangsfaktoren (Input) zu einer definierten Ausbringungsmenge (Output) ersichtlich wird [KUPR91]. Zur Leistungserbringung sind bestimmte Aufwendungen in Kauf zu nehmen, um den gewünschten Nutzen zu erzielen [RINZ92]. Der Nutzenbeitrag ist vor dem Hintergrund der betrieblichen Zielsetzung zu beurteilen. In der Regel wird für einzelne Produktions- oder Arbeitssysteme kein (monetär bewerteter) Wertzuwachs definiert. Dies erfolgt implizit über die Beschreibung

der Anarbeitungszustände des Produktes (Fertigstellungs- bzw. Wertschöpfungsgrad) vor und nach dem jeweiligen Arbeitsvorgang über die Arbeitspläne. Vielmehr konzentriert sich die Aussage zum erbrachten Nutzen eines Produktionssystems auf die Erreichung zum einen des Sachziels (Effektivität im Sinne einer bestimmten stückzahlbezogenen Systemleistung) und zum anderen ergänzender Formalziele (Effizienz). Eine monetäre Bewertung des Nutzens ist daher in der betrieblichen Praxis unüblich, da die Effektivität des Produktionssystems und damit die Gewährleistung einer definierten Gutmengenausbringung vorab planerisch bedacht wurde (vgl. [AGGT90], [GRUN12]). Daher stellt die sukzessive Wertschöpfung kein Beurteilungskriterium, sondern vielmehr eine zwingende Forderung dar. Im Gegensatz dazu ist der Aufwand sehr wohl in Geldeinheiten anzugeben.

Neben einer Charakterisierung der (geplanten) Ablaufstruktur bedarf es daher einer dynamischen Analyse des tatsächlichen Systemverhaltens auf Grund der engen Wechselwirkung beider Aspekte. Infolgedessen kann der realisierte Transformationsprozess unter Effizienz- und Effektivitätsgesichtspunkten anhand der betrieblichen Zielgrößen beurteilt werden. Die gängigsten Größen zur eindeutigen Bewertung des Zustands der laufenden Produktion stellen die Durchlaufzeit, der Umlaufbestand, der Durchsatz, die Auslastung, die Termintreue sowie die Kosten dar (vgl. [NYHU12]). Daneben existieren noch zahlreiche Kennzahlen für die Produktion (z. B. VDI-Richtlinien 4400, Blatt 1 bis 3 (Logistikkennzahlen für Beschaffung, Produktion und Distribution), 4490 (Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand) sowie 2525 (Praxisorientierte Logistikkennzahlen für kleine und mittelständische Unternehmen) oder VDMA-Richtlinie 66412 (Manufacturing Execution Systems – Kennzahlen)). Für die kundenbezogene Produkterstellung dominiert die Verbesserung transvariabler Maßzahlen (Wertzuwachs, Umlaufbestand, Durchlaufzeit und Termintreue) gegenüber intervariabler Kenngrößen (Ausbringungsmenge, Durchsatz) [KÜHN09], [FÖRS99].

Im laufenden Betrieb verursacht die Inanspruchnahme der Potenzialfaktoren bzw. Ressourcenelemente einen Aufwand in Form von Leistungserstellungskosten. Diese werden in der betrieblichen Kostenrechnung als Herstell- bzw. Selbstkosten subsummiert (vertiefend [WÖHE13], [OLFE10]). Gemäß dem allgemeinen Kalkulationsschema fallen darunter [GÖTZ10]:

- Materialkosten (Materialeinzel- und Materialgemeinkosten),
- Fertigungskosten (Fertigungseinzelkosten, Fertigungsgemeinkosten sowie Sondereinzelkosten der Fertigung) und
- Verwaltungsgemeinkosten und Vertriebsgemeinkosten (zzgl. Sondereinzelkosten des Vertriebs).

Da als Fertigungseinzelkosten üblicherweise nur die direkt zurechenbaren Fertigungslöhne Berücksichtigung finden [OLFE10], die arbeitsmittelbezogenen Kosten des Herstellungsprozesses insbesondere bei der variantenreichen Serienfertigung allerdings einen großen Anteil der anfallenden monetären Aufwände darstellen, werden die Fertigungsgemeinkosten nochmals unterteilt (Abbildung 3-7). Auf Basis der Maschinenlaufstunden erfolgt die Unterscheidung in variable und fixe arbeitsmittelabhängige Fertigungsgemeinkosten. Bei den restlichen Gemeinkosten bilden die Fertigungslöhne weiterhin die Zuschlagsgrundlage. Die fixen arbeitsmittelabhängigen Fertigungsgemeinkosten werden durch den Einsatz technischer Ressourcen verursacht und bestehen hauptsächlich aus Abschreibungen, Platzkosten, kalkulatorischen Zinsen sowie Instandhaltungs- und Reparaturkosten. Der von der konkreten Laufzeit abhängige und damit variable Teil der direkt den jeweiligen Arbeitsmitteln zurechenbaren Fertigungsgemeinkosten beinhaltet vorwiegend Kosten für Hilfs- sowie Betriebsstoffe und Energie.

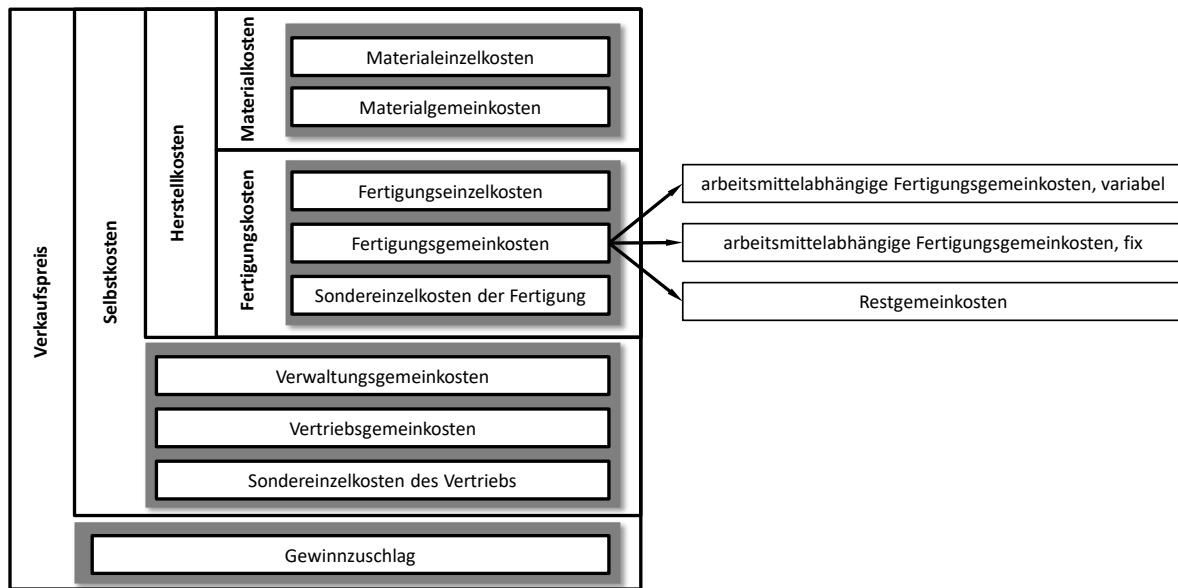


Abbildung 3-7: Kalkulationsschema der Herstell- und Selbstkosten

Als maßgebliche nicht-monetäre Kenngrößen dienen im weiteren Verlauf die Durchlaufzeit, der Umlaufbestand, die Termintreue und die Leistung [NYHU12], [LÖDD08]. Bestand und Auslastung bzw. Leistung spiegeln die System- oder Ressourcensicht am treffendsten wider, weil sie ausdrücken, wie groß der Arbeitsvorrat (Bestand) ist, der sich im Produktionssystem anhäuft, und wie sich das Verhältnis von abgearbeiteten Arbeitsumfängen und zur Verfügung stehender Zeit darstellt (Leistung bzw. Auslastung). Die Termintreue bezeichnet hingegen ein gesamtsystemisches Gütekriterium hinsichtlich der summarischen Einhaltung vorgegebener Fertigstellungstermine. Eng damit verknüpft ist die Durchlaufzeit, die die Verweildauer der einzelnen Aufträge im Produktionssystem repräsentiert.

Einen allgemeingültigen Ansatz zur Beschreibung von Produktionsprozessen bildet das Trichtermodell. Es stellt die quantitativen Beziehungen der logistischen Zielgrößen zueinander dar [NYHU12], [LÖDD08]. Das Trichtermodell basiert auf der Grundidee, den Transformationsprozess über eine Input-Output-Betrachtung eines Arbeitssystems zu charakterisieren [LUCZ99]. In der Analogie zur Abbildung verfahrenstechnischer Fließprozesse geht es davon aus, dass das Durchlaufverhalten eines Arbeitssystems durch die Größen Zugang, Bestand und Abgang beschrieben werden kann [BECH84], [NYHU12], [NYHU08].

Der Zugang an Fertigungsaufträgen ergibt zusammen mit dem bereits vorhandenen Arbeitsvorrat den Bestand am betrachteten Arbeitssystem. Dabei ist die Größe der Aufträge entsprechend der Höhe der Auftragszeit gewählt. Die Aufträge fließen nach ihrer Bearbeitung aus dem Trichter ab. Die Größe der Trichteröffnung symbolisiert dabei die Leistung des Arbeitssystems, die bis zur maximalen Kapazität erhöht werden kann. Demnach bestimmt sie die Höhe des Abgangs an Fertigungsaufträgen [NYHU12], [NYHU08], [LÖDD08]. Das Trichtermodell ist eng verbunden mit dem Gesetz von Little [LITT61], das basierend auf der Warteschlangentheorie ebenfalls das Verhältnis der drei produktionslogistischen Zielgrößen folgendermaßen bestimmt (zu den Unterschieden siehe vertiefend [NYHU12], [NYHU08], [LÖDD08]):

$$\text{Durchlaufzeit} = \frac{\text{Umlaufbestand}}{\text{Durchsatz}}$$

Im Sinne der Systemtheorie lässt sich dieser Ansatz folglich von einzelnen Arbeitssystemen auf das ganze Produktionssystem übertragen.

Anhand der produktionslogistischen Zielgrößen lassen sich einzelne Arbeitssysteme sowie gesamte Produktionsbereiche mit Hilfe von Betriebskennlinien hinsichtlich ihres Verhaltens charakterisieren [NYHU12], [SCHN04]. Kennlinien, die sich in den Ingenieurwissenschaften als Beschreibungsform mathematisch-funktionaler Beziehungen zwischen Kennzahlen technischer oder soziotechnischer Systeme etabliert haben, sind graphische Darstellungen des Zusammenhangs zwischen einer unabhängigen Einflussgröße und einer sich ergebenden Zielgröße in Form einer Kurve [NYHU12] [INDE08].

Die charakteristischen Eigenschaften von Produktionssystemen können durch relevante Kenngrößen (Durchlaufzeit, Leistung/Durchsatz, Termintreue, Kosten) somit eindeutig beschrieben werden. Der Verlauf der resultierenden Kennlinien bei einer Bestandsveränderung mit ansonsten unveränderten Randbedingungen ist dabei typisch.

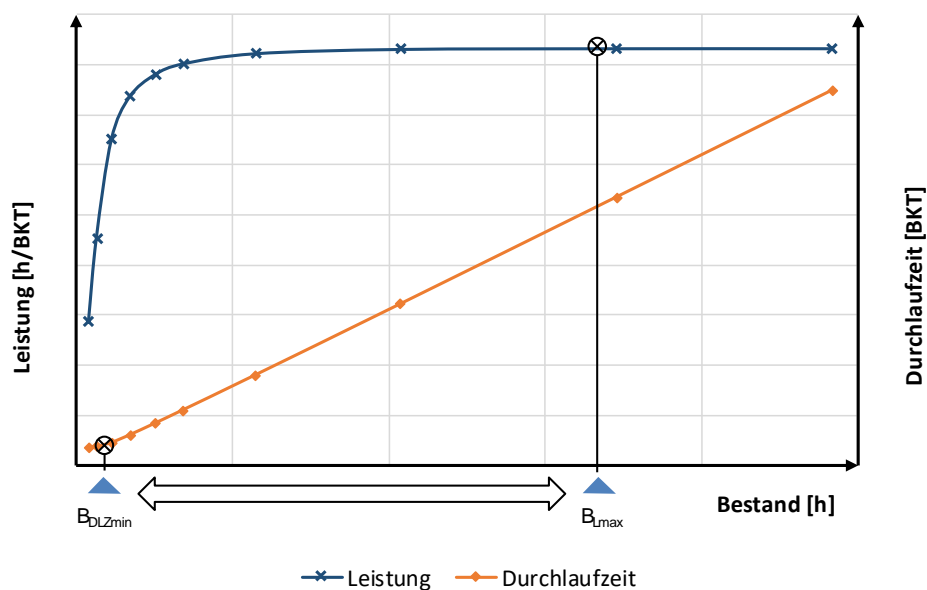


Abbildung 3-8: Zielgrößenabhängige Wahl des Betriebspunktes

Da auf Grund der wechselseitigen Abhängigkeiten der Kenngrößen nicht alle Ziele gleichzeitig optimal erfüllt werden können, gibt es folglich nicht nur einen idealen Betriebspunkt (vgl. Polylemma der Ablaufplanung). Die strategische Positionierung hinsichtlich der Zielgrößen erfolgt in Abhängigkeit von der aktuellen wirtschaftlichen und wettbewerblichen Situation des betrachteten Unternehmens. Da sich diese im Laufe der Zeit verändert, ist der einmal gewählte Betriebspunkt nicht stationär, sondern kann während der Betriebsphase eines Produktionssystems variieren (Abbildung 3-8). Die grundsätzlichen Berechnungsvorschriften zu Ermittlung des Betriebspunktes finden sich in Anhang A.

Für ein einzelnes Arbeitssystem bildet wiederum die Kennlinien-Theorie die wissenschaftliche Fundierung in Form einer mathematischen Beschreibung der Kurvenverläufe von Leistung und Durchlaufzeit in Abhängigkeit des Bestandes (vgl. [NYHU12], [NYHU08], [LÖDD08]). Die Abszissen- (Bestand) und Ordinatenwerte (Leistung) werden dabei mittels eines hergeleiteten funktionalen Zusammenhangs (Trichtermodell) auf Basis eines theoretischen Bestandsminimums (idealer Mindestbestand) bzw. der maximalen Leistung und einer Laufvariable berechnet. Die abgeleiteten Beziehungen gehen dabei über formelmäßige Rechenvorschriften hinaus und schließen nicht geschlossen mathematisch formulierte Zusammenhänge mit ein [BOHL14]. Neben Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinien existieren mittlerweile auch Vorgehen zur Ermittlung von Termintreue- und Kostenkurven [NYHU12], [JAIN93], [KERN02].

Voraussetzung für die Anwendung der Kennlinien-Theorie ist das Vorliegen eingeschwungener, stabiler Zustände im Produktionssystem, bei denen Zugänge und Abgänge zeitversetzt parallel verlaufen und sich somit ein konstanter mittlerer Umlaufbestand ergibt. Die Kurven resultieren aus einzelnen mittelwertbasierten Punkten für unterschiedliche Belastungssituation (mit jeweils konstanten Beständen). Dieser Ansatz ermöglicht somit zwar infolge einer vorherigen Charakterisierung des Systems und der Auftragsstruktur, ohne Simulation oder großartige Datenerhebungen Kennlinien zu ermitteln, jedoch beschränkt er sich auf die isolierte Betrachtung einzelner Arbeitssysteme [NYHU12]. Eine Erweiterung auf Produktionssysteme ist zusätzlich an das Vorhandensein einer stabilen Engpass-Situation geknüpft [SCHN04]. Diese Forderung erscheint für variantenreiche Serienfertigungen im turbulenten Umfeld mit ständigen störungsbedingten Abweichungen ebenso wenig realistisch wie das Vorliegen eingeschwungener Zustände [NYHU12]. Die berechneten Kenngrößen stellen zudem reine Durchschnittswerte der periodenbezogenen Betrachtung dar und eignen sich daher nicht für die Steuerung eines Produktionssystems [KENN15], [WIEN02].

Dennoch lässt sich das Systemverhalten anhand der typischen Zielgrößen hervorragend beschreiben. Auf Basis unterschiedlicher Belastungssituationen des Systems können zudem reale Betriebskennlinien ermittelt werden, bei denen allerdings keine langfristige Mittelwertbildung, sondern nur eine Zustandserfassung der jeweiligen Kennzahlen (Bestand, Durchlaufzeit, Leistung) zulässig ist.

3.2.4 Bewertung der Veränderungsfähigkeit

Die Bewertung der Veränderungsfähigkeit erfolgt unabhängig von ihrem konkreten Anwendungsbereich bzw. der Abstraktionsebene im Zuge der Fabrik- oder Produktionssystemplanung zumeist als eines von mehreren Entscheidungskriterien für ein Strukturkonzept [NYHU13].

Bei der Bewertung der Flexibilität bzw. Wandlungsfähigkeit stehen stets einzelne Fabrikobjekte (Anlagen, Transportsysteme, Flächen usw.) sowie bestimmte Anforderungen (Menge, Variantenanzahl, Zeit usw.) im Vordergrund [HEGE06]. Eine systemische Untersuchung der Veränderungsfähigkeit in Form eines durchgängigen objektiven Bewertungsmaßstabes für Produktionssysteme jenseits subsummierter Einzeleinschätzungen besteht nicht. Eine Vielzahl der Arbeiten zu den Wirkungsbereichen anpassungsfähiger Systemelemente bezieht sich bei ihrer Bewertung auf zeitliche und intensitätsbezogene Aspekte. Vordergründig können die Geschwindigkeit der Anpassung sowie ihr Umfang, in der Regel gemessen an der jeweiligen Zielgröße (z. B. Mengenleistung, Durchlaufvariabilität, Anzahl Produktvarianten), als wesentliche quantitative Gütefaktoren der Veränderungsfähigkeit angesehen werden (vgl. [NYHU13], [KOB00], [FÖRS99]). Darüber hinaus erfolgt im Zuge der Planung die Vorausbestimmung und Auswahl einer geeigneten Konfiguration zumeist anhand ihrer über Nutzwerte abgebildeten Vorteilhaftigkeit (vgl. [KLEM14], [GRUN12], [HEGE06], [DRAB06]). Dies stellt letztlich eine universelle Methode zur semi-quantitativen Beurteilung der positiven Beiträge von Alternativen dar (vgl. [ZANG76]). Eine Quantifizierung in Form von objektiven Kennzahlen erfolgt in der Regel nicht.

Um eine möglichst umfassende Aussage zur Güte einer fabrikplanerischen Entscheidung machen zu können, bedarf es jedoch der Erfassung und Bewertung sowohl ihrer positiven als auch negativen Auswirkungen. Insofern sind die Nutzenbeiträge im Sinne der Vorteilhaftigkeit sowie die damit einhergehenden (monetären) Aufwände einer Strukturlösung bzw. von notwendigen Adaptionsmaßnahmen gleichermaßen zu berücksichtigen (vgl. [RINZ92]). Daher steht bei der Beurteilung eines angemessenen Niveaus an Veränderungsfähigkeit stets der Abgleich des Aufwandes für das Vorhalten von variablen Systemelementen oder -relationen und ihrem Nutzenbeitrag hinsichtlich der betrieblichen Zielstellungen im Vordergrund.

Bei der Beurteilung des potenziellen Aufwandes zur Strukturadaption existieren wiederum zahlreiche Ansätze. Neben der bereits thematisierten Ermittlung der Dauer der Umstellung stehen die dazugehörigen Kosten zumeist im Mittelpunkt der Betrachtungen. Diese werden über Realloptionen [MÖLL08], Prozesskosten [KERN02] oder die klassische Investitionsrechnung [HALL99] bewertet. Darüber hinaus wird der Unsicherheit der Eingangsinformationen auf Grund turbulenter Umweltbedingungen z. B. durch die Szenariotechnik [HERN02] oder Verfahren des Risikomanagements [BRED14], [KREB12], Rechnung getragen. Die Kostenbewertung der Veränderungsfähigkeit erfolgt ebenfalls meist auf Basis der Systemelemente. Es existiert kein Ansatz, der explizit die Produktionsstruktur, wie sie in dieser Arbeit definiert ist, berücksichtigt. Insofern wird vor allem der Anteil strukturabhängiger Kosten bei der Beurteilung bestehender Produktionssysteme vernachlässigt.

Löffler präsentiert einen andersartigen Bewertungsmaßstab für die betrieblichen Aufwände der Veränderungsfähigkeit [LÖFF11]. Die zentrale Bewertungsgröße der Planungssystematik schließt den gesamten Produktentwicklungsprozess ein und bildet ein Maß dafür, mit welchem zeitlichen Verbrauch die definierte Gesamtprozesskette durchlaufen wird. Einzig auf Basis dieser Größe erfolgt die Kalkulation des Aufwandes für Strukturanpassungen. Da allerdings die zeitverbrauchenden Aktivitäten sich hinsichtlich ihrer Kostensätze mitunter gravierend unterscheiden, ist auch dieser Ansatz für eine entscheidungsrelevante Beurteilung einer Produktionsstruktur unzureichend.

Die Nutzung regelkreisbasierter Vorgehensweisen zur planerischen Vorwegnahme von Strukturadaptionen in der Literatur ist evident (vgl. exemplarisch [KLEM14], [NYHU13], [LÖFF11]). Dabei steht häufig das Kosten-Nutzwert-Verhältnis im Vordergrund (vgl. [KLEM14], [DOHM01], [HEIN06], [SEST03]). Methodisch gewährleistet dies zwar grundsätzlich eine universelle Anwendbarkeit, jedoch hängt die Bewertungsgrundlage somit stets von der subjektiven Festlegung und Einschätzung der jeweiligen Untersuchungskriterien ab (vgl. [ZANG76], [RINZ92]).

Der Aspekt der Strukturverifikation im Sinne der Überprüfung von Produktionssystemen findet sich einzig als wesentlicher Bestandteil des Ansatzes von Hartmann wieder [HART95]. Zentraler Bestandteil seiner Arbeit ist der Bewegungsraum einer Leistungseinheit, der durch die Dimensionen Ziele, Ressourcen und Randbedingungen aufgespannt wird. Erstere bezeichnen die konkrete Produktionsaufgabe sowie die zu erreichenden Leistungsdaten. Der Ressourcen-Aspekt umspannt neben Material, Betriebsstoffen und Verfügbarkeit die personellen und technischen Kapazitäten. Die Randbedingungen subsumieren Arbeitszeitaspekte oder tarifvertragliche Regelungen. Für die benannten Dimensionen werden zulässige Ober- oder Untergrenzen bestimmt, die die Autonomie der Leistungseinheit abstecken. In der Betriebsphase erfolgt eine Ermittlung der aktuellen Position im Bewegungsraum. Die Betrachtungsobjekte (Produktionssysteme) werden hierbei über entsprechende Regelkreise laufend überprüft. Befindet sich das Produktionssystem innerhalb des Bewegungsraums, besteht kein zwingender Handlungsbedarf. Bei einer Position außerhalb sind technische, personelle oder strukturelle Maßnahmen notwendig, um die Leistungseinheit in den zulässigen Bereich zurückzuführen.

Es bleibt zu konstatieren, dass es den Ansätzen der Wandlungsfähigkeit insgesamt an spezifischen methodisch fundierten Vorgehensweisen und allgemeingültigen Bewertungskriterien fehlt (vgl. [WIEN02a]), die jenseits universeller Methoden (z. B. Nutzwertanalyse, Szenariotechnik usw.) eine objektive Beurteilung der Veränderungsfähigkeit ganzer Produktionssysteme ermöglichen. Zudem werden bislang eigenschaftsändernde Einflüsse bei der Strukturregelung wie Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit vollkommen vernachlässigt. Dies erhöht die Attraktivität der Betrachtung, wie resilient sich Produktionsstrukturen bei wechselnden Anforderungen und Fertigungsbedingungen verhalten.

Resilienz stellt zwar hinsichtlich der Veränderungsfähigkeit das umfassendste Konzept dar, findet aber insbesondere in der deutschsprachigen Literatur erst allmählich Eingang. Da dieser Ansatz aus anderen Disziplinen in die Ingenieurwissenschaften getragen wurde [BHAM11], mangelt es ihm bislang zudem

an Operationalisierung. Ein Hauptanwendungsbereich stellt neben der Psychologie und Biologie (vgl. [KITA04], [HOLL96]) das Katastrophenmanagement (vgl. [ADAM12], [BRUN03]) sowie das Supply-Chain-Management (vgl. [WIEL13], [WIEL12]) dar.

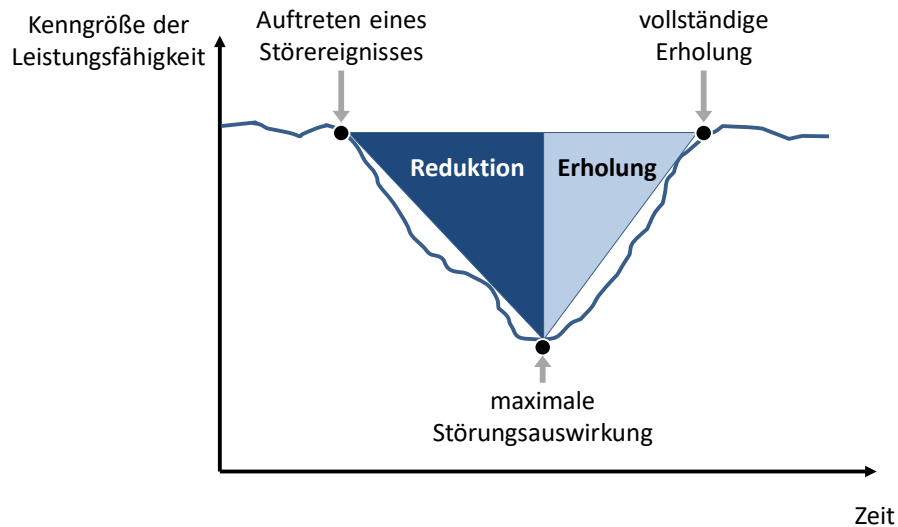


Abbildung 3-9: Resilienz-Dreieck (vgl. [ADAM12])

Einen Ansatz zur Messung von Resilienz bildet das Resilienz-Dreieck (vgl. [BRUN03], [ADAM12]). Ausgehend von einer konkret definierten Zielgröße beschreibt es die (zumeist negative) idealisierte Veränderung der Messwerte der Leistungsfähigkeit im Zeitverlauf, bis eine schrittweise Erholung eintritt. Am Beispiel der Verkehrsüberwachung lässt sich so der reduzierte Durchsatz an Fahrzeugen (auf Grund der erhöhten Fahrzeit bei zunehmender Staulänge) bei Eintreten eines Unfalls in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens beschreiben. Das Resilienz-Dreieck stellt allerdings eher ein grundsätzliches Beschreibungsmodell dar (Abbildung 3-9). Auf Grund der Abhängigkeit von der konkreten Systemkonfiguration und der nichtlinearen Zusammenhänge bei der variantenreichen Serienfertigung kann hier vielmehr von einem kontextabhängigen Funktionsverlauf ausgegangen werden (vgl. [MUNO15], [DORB11], [MCDA08]). Auf Grund der Vielfalt an Definitionen der Resilienz besteht keine Einigkeit über die konkrete Kenngröße für die Funktionalität und somit kein einheitliches Vorgehen zu deren Berechnung (eine Übersicht möglicher mathematischer Ansätze bieten Munoz und Dunbar [MUNO15]).

Zudem wird bei bisherigen Betrachtungen weder der Robustheit noch der Agilität ausreichend Beachtung geschenkt, so dass auch hier die Operationalisierung im produktionswirtschaftlichen Kontext fehlt. Dabei bieten bereits die jeweiligen Definitionen Anhaltspunkte für eine Quantifizierung beider Aspekte, denen es jedoch bislang an Konkretisierung mangelt. Die Robustheit stellt per definitionem die Beibehaltung der Eigenschaften (in einem definierten Ausprägungsbereich) eines Systems dar. Da das Ausmaß der verbliebenen Funktionalität erst während der Leistungserstellung, also im laufenden Betrieb, ersichtlich wird, sind die maßgeblichen Kriterien der Funktionsfähigkeit die produktionslogistischen Zielgrößen, die gleichzeitig die allgemeine Bewertungsgrundlage der Produktionssystemkonfiguration basierend auf dem gezeigten Systemverhalten bilden. Derart kann die Robustheit eines Produktionssystems grundsätzlich über die Kenngrößen Durchlaufzeit, Termintreue, Auslastung bzw. Leistung, Bestand oder Kosten abgebildet werden. Die Agilität hingegen ist geprägt von Handlungsschnelligkeit (Zeitdimension) und Auswirkung der Maßnahmen (Intensitätsdimension).

Es lässt sich festhalten, dass eine Vielzahl von Bewertungsansätzen zu diesem Themenkomplex existiert. Allerdings beziehen sich die bestehenden Ansätze selten auf die Beurteilung bestehender Produktionssysteme. Auf Grund widersprüchlicher und sich überschneidender Begriffsinhalte der in der

Literatur vorhandenen Definitionen und Konzepte von Veränderungsfähigkeit geht zudem der operative Bezug zu konkret messbaren Kennzahlen verloren, die aber zur Beurteilung von Produktionsstrukturen erforderlich sind (vgl. [SEST03]). Daraus resultiert die Vielzahl divergenter Ansätze, die sich um eine Bewertung abgegrenzter Aspekte der Anpassungsfähigkeit und Resilienz der Konfiguration von Produktionssystemen bemühen.

3.3 Ermittlung des Forschungsbedarfs

Zusammenfassend erfolgt an dieser Stelle eine summarische Ableitung von Anforderungen aus den bisherigen Betrachtungen. Dabei werden die relevanten Defizite des aktuellen Forschungsstandes beleuchtet und der konkrete Untersuchungsbedarf ermittelt.

Auf Grund ihrer turbulenten Umwelt sind Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung regelmäßig variierenden Leistungsanforderungen unterworfen. Die daraus resultierende Komplexität des Produktionssystems wird durch interne Störungen zusätzlich gesteigert. Sowohl die externe Belastung durch das zu bewältigende Produktionsprogramm als auch störungsbedingte Abweichungen, die die Systemeigenschaften zumindest temporär ändern (z. B. Ausfall von Ressourcenelementen), stellen eine Inanspruchnahme bzw. Beanspruchung des Leistungspotenzials einer Produktionsstruktur dar. Damit gehen mitunter veränderte Variabilitätsanforderungen einher, denen mit entsprechenden Resilienzeigenschaften (Belastbarkeit) des Produktionssystems zu begegnen ist. Allerdings findet das Konzept der Resilienz bislang noch keinen Eingang in die betrieblichen Erwägungen zur Beurteilung der Veränderungsfähigkeit von Produktionsstrukturen, welche bisher vor allem auf Ebene der einzelnen Ressourcenelemente stattfindet. Folglich ist eine gezielte Überprüfung der Produktionsstrukturen anzustreben, um Anpassungsbedarfe auf den unterschiedlichen Eingriffsebenen rechtzeitig zu identifizieren.

Ändern sich im Zeitverlauf die Anforderungen an das Produktionssystem (Produktionsprogramm) bzw. die Umfeldbedingungen, bedarf es zunächst einer Beurteilung der Eignung bestehender Produktionsstrukturen hinsichtlich der anstehenden Auftragsituation und der Resilienz mittels passender Bewertungskennzahlen im laufenden Betrieb. Hierbei fehlt es dem Planer an praktischen Kenngrößen zur Einschätzung der Güte der bestehenden strukturellen Konfiguration [KUPR91]. Bislang erfolgt zumeist nur eine einseitige Betrachtung des Systemaufbaus bei der Struktursynthese, da gemeinhin die zeitliche Komponente erst durch den zeitlichen Ablauf der Produktionsprozesse (Strukturbetrieb) bestimmt wird [SCHM95], [KETT84], [GRUN12]. Für beide Betrachtungsbereiche existieren vornehmlich separate Beurteilungsmaßstäbe bezüglich ihrer Eignung für anstehende Produktionsaufgaben. Insbesondere um die Wechselwirkung der einzelnen Strukturdimensionen berücksichtigen zu können, empfiehlt sich daher eine dichotome Betrachtung (Abbildung 3-10).

Vor dem Hintergrund einer passenden Balance zwischen Robustheit und Agilität sowie einer effizienten Funktionserfüllung bedarf es eines Bewertungsmaßstabes, der all diese Aspekte vereint. Dazu werden allerdings auch geeignete Kenngrößen benötigt, die sowohl die wechselnden Anforderungen aus dem Produktionsprogramm als auch die Störungen des Systems, die zu Abweichungen führen, adäquat berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund sind neben der Resilienz auch die funktionale Grobstruktur der Produktion sowie die zeitlichen und räumlichen Wirkebenen der strukturellen Lösung sowie ihr Beitrag zur Erfüllung der betrieblichen Zielstellungen zu operationalisieren. Im volatilen Produktionsumfeld sind eingeschwungene bzw. stabile Prozesszustände nur äußerst selten vorzufinden, so dass die auf den Kenngrößen von Trichtermodell und Kennlinien-Theorie beruhende mittelwertbasierte Planung zwangsläufig zu Fehlern und ständigen Anpassungsbemühungen führt [WORB03], [WIEN06]. Daher ist eine konkrete Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der betroffenen betrieblichen Zielwerte

unabhängig. Insofern bedarf es eines geeigneten Maßstabes zur realistischen Abbildung der bestehenden und zukünftigen Belastungssituation von Produktionssystemen hinsichtlich ihrer dynamischen Wirkung auf die Eignung der bestehenden strukturellen Konfiguration.

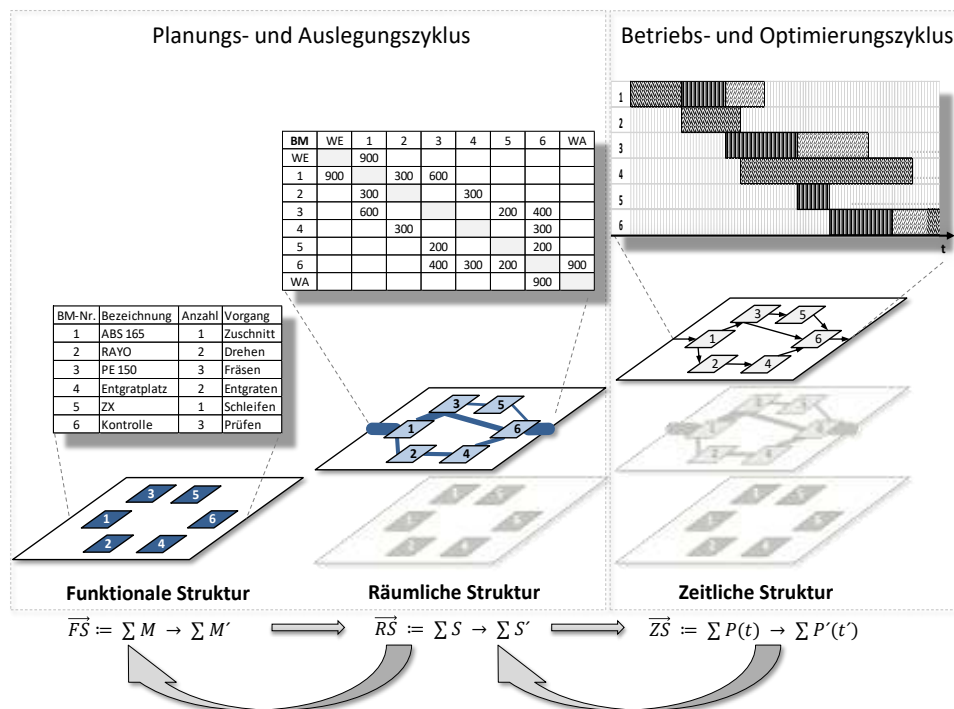


Abbildung 3-10: Wechselwirkungen der strukturellen Ebenen

Im Betriebszyklus liegt der Fokus auf der Produktionsregelung und der fortwährenden Anpassung der zeitlichen Struktur. Da der Systemaufbau aber maßgeblich die Funktionalität des Systems bestimmt [HILD05], ist eine Adaption der räumlichen Struktur und sogar der Systemzusammensetzung in Erwägung zu ziehen, falls eine Veränderung des Systemverhaltens nicht mehr über direkte Anpassung der Ablaufstruktur herbeigeführt werden kann. Dies geht mit einer Erweiterung des potenziellen Lösungsraumes bei regelkreisbasierten Eingriffen einher. Sind prozessuale Potenziale ausgeschöpft, bedarf es des Ergreifens zieladäquater Handlungsalternativen unter Einbeziehen räumlicher Strukturadaptionen. Im Fortgang kommt zusätzlich die Rekonfiguration der funktionalen Grobstruktur mit ihren Auswirkungen auf die produktspezifische Zuordnung von Fertigungsumfängen zu den einzelnen Leistungseinheiten in Frage.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass kein durchgehender Maßstab zur Beurteilung der Eignung einer Struktur hinsichtlich der effizienten Funktionserfüllung und ihrer Resilienz zum Erhalt der systemischen Funktionalität während der Einwirkung von Störungen oder Variation der Systembelastung existiert. Zudem finden bisher Handlungsalternativen zur sukzessiven Anpassung der Systemkonfiguration (funktionale, zeitliche und/oder räumliche Struktur) nur unzureichend Berücksichtigung. Insbesondere bleibt bislang unklar, bis zu welchem Punkt eine Produktionsstruktur unter sich ändernden internen sowie externen Einflussgrößen wirtschaftlich vertretbar ist.

Daraus lässt sich folgende Forschungsfrage ableiten:

Wie muss eine aussagekräftige Bewertungssystematik gestaltet sein, um die betrieblichen Akteure in die Lage zu versetzen, die Eignung und Resilienz von Produktionssystemen zu beurteilen und sie darüber hinaus sowohl beim Erkennen des korrekten Zeitpunkts als auch dem Ergreifen der besten Handlungsalternative im Rahmen der Adaption der (funktionalen, räumlichen und/oder zeitlichen) Systemstruktur zu unterstützen?

4 Zielstellung der Arbeit

Ausgehend vom zuvor identifizierten Forschungsbedarf erfolgen in diesem Kapitel die Konkretisierung der Zielstellung und die Ableitung einer geeigneten Vorgehensweise für den weiteren Verlauf der Arbeit.

Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist eine geeignete Konfiguration der Produktion unerlässlich, die sowohl effizient als auch resilient genug ist, um die fluktuierenden Umfeldbedingungen zu bewältigen und dennoch ein ausreichendes Maß an Wirtschaftlichkeit aufzuweisen. Insbesondere auf Grund der variierenden Anforderungen ergibt sich daher die Zwangsläufigkeit zu Beurteilung der Angemessenheit bzw. Güte einer vorliegenden Produktionsstruktur vor dem Hintergrund des Erfüllungsgrades der betrieblichen Ziele sowie des korrespondierenden Aufwandes. Die Überprüfung der Konfiguration des Produktionssystems soll daher folgende Aspekte berücksichtigen:

- Vermögen zur Bewältigung des anstehenden Produktionsprogramms im vorgesehenen Zeitraum (Suffizienz bzw. Effektivität des Systems als Fähigkeit zur Funktionserfüllung),
- Wirtschaftlichkeit der Funktionserfüllung (Effizienz der Funktionserbringung) und
- Resilienz (Erhalt der Funktionsfähigkeit).

Dabei sind stets die sich verändernden Variabilitätsanforderungen hinsichtlich der Verschiebungen in der Produktionsaufgabe (Variationen) sowie des Wechsels der Störungscharakteristik (Abweichungen) zu beachten. Ausgehend vom systemtheoretischen Ansatz bedarf es einer differenziellen Beurteilung der funktionalen, räumlichen und zeitlichen Strukturkomponenten von Produktionssystemen hinsichtlich der betrieblichen Leistungsanforderungen (Produktionsaufgabe), der definierten Zielsetzung und des bestehenden Produktionsumfeldes.

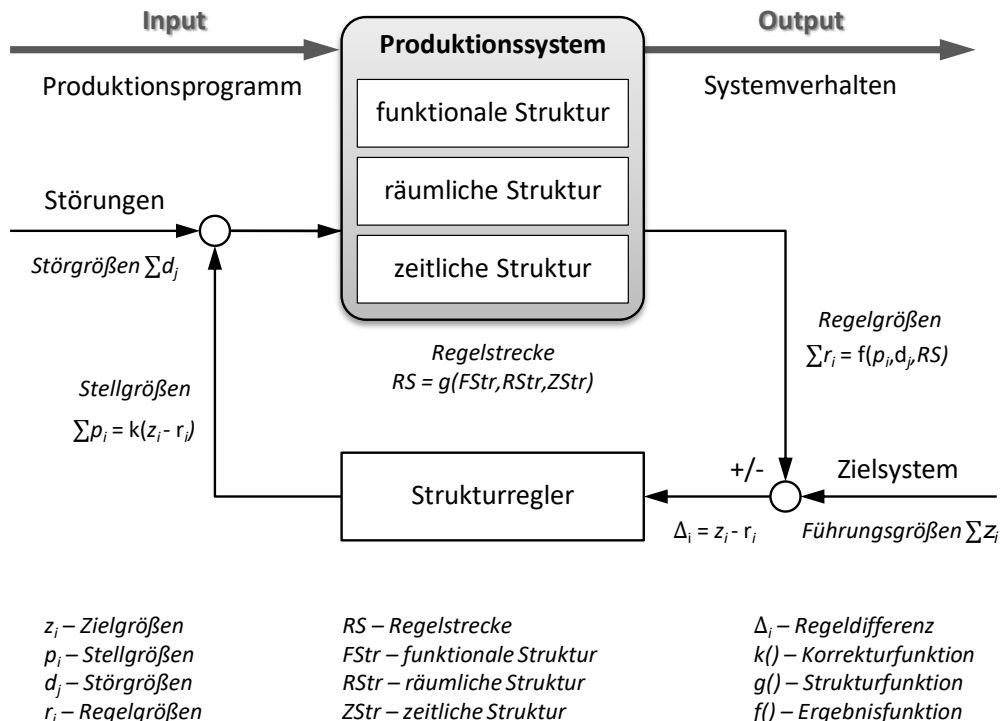


Abbildung 4-1: Ansatz zur Strukturregelung

Dafür sind die wirtschaftlichen und resilienzorientierten Anforderungen an das Produktionssystem in entsprechende Messgrößen zu überführen und zu operationalisieren. Die derart festgelegten dynamischen Kennzahlen bilden das Zielsystem und spiegeln gleichzeitig den Bewertungsmaßstab zur Zielerreichung wider. Im Zentrum der Methodenentwicklung steht es, mit Hilfe einer situativen Strukturbeurteilung die Selbstregulation organisatorischer Leistungseinheiten (Produktionssysteme) zu unterstützen. Dazu bietet sich der Einsatz eines Regelkreises zur Strukturbeurteilung an (Abbildung 4-1), der auf Basis einer realitätsgetreuen Abbildung der Belastungssituation das Systemverhalten bestehender Produktionsstrukturen anhand geeigneter Kennzahlen und Indikatoren überwacht.

Neben der grundsätzlichen Erfüllung der Planungsprämisse (Funktionalität bzw. Effektivität) steht gerade im Strukturbetrieb die Absicherung der Wirtschaftlichkeit (Effizienz) der Produktionsprozesse im Mittelpunkt. Dagegen konzentriert sich die Resilienz vorrangig auf die Aufrechterhaltung bzw. Wiedererlangung der Funktionalität, was der Gewährleistung der Wirksamkeit (Effektivität) und Potenzialentfaltung der Produktionsstruktur entspricht. Insofern stellt die Effektivität des Produktionssystems trotz der Variabilität der Randbedingungen stets eine grundlegende Voraussetzung der Effizienzbetrachtung dar. Daher konzentriert sich die methodische Entwicklung im Fortgang auf die jeweiligen Wirtschaftlichkeitsaspekte der Leistungserbringung unter Sicherstellung einer definierten Funktionalität.

In diesem Zusammenhang rückt die Überprüfung struktureller Kennzahlen zur Identifikation eines etwaigen Veränderungsbedarfes und damit zum Aufdecken des Zeitpunktes notwendiger Strukturadaptionen in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Darauf aufbauend soll ein spezifisches Vorgehen zur resilienzorientierten Strukturbeurteilung konzipiert werden, das den betrieblichen Akteur in die Lage versetzt, frühzeitig Entscheidung hinsichtlich der gezielten Anpassung des Produktionssystems an sich ändernde Umfeldbedingungen zu treffen und ebenso bei signifikanten Verschiebungen summarischer Störereignisse adäquate Handlungsalternativen auszuwählen.

Dabei wird ausgehend von der Belastung des Produktionssystems in Form eines zu bewältigenden Produktionsprogramms das Niveau der resultierenden Beanspruchung anhand eines Aufwand-Nutzen-Verhältnisses ermittelt und in eine quantitative Maßzahl überführt. Im Sinne einer zielkonformen Regelung gilt es, die anlassbezogene Neukonfiguration der Produktionsstruktur auf Grund veränderter Auftragsituationen oder auftretender Störereignisse zu ermöglichen. Dafür sind sowohl reaktive als auch proaktive Eingriffe in die Struktur zu berücksichtigen, die Anpassungen des Systemaufbaus und der Systemzusammensetzung einschließen.

Damit lassen sich folgende spezifische Zielstellungen bzw. erforderliche Schritte ableiten:

- Anlassbezogene Prüfung der bestehenden Struktur hinsichtlich der Fähigkeit zur effizienten Funktionserfüllung und fortwährende Überwachung des Systemverhaltens bezüglich der Resilienzeigenschaften
- Definition geeigneter Kenngrößen und Indikatoren zur Strukturbeurteilung und Aggregation zu einem aussagekräftigen Kennzahlensystem, welches zum einen Veränderungsbedarfe identifiziert und auf Basis der Bestimmung von Potenzialen zum anderen das gezielte Ergreifen von resilienzorientierten Adaptionenmaßnahmen unterstützt
- Ermittlung eines Maßstabes zur durchgängigen Bewertung der Vorteilhaftigkeit von strukturellen Konfigurationen einschließlich zweckmäßiger Adaptionen unter Berücksichtigung der ökonomischen Effizienz und der Resilienz
- Zusammenführung der Identifikation von Veränderungsbedarfen, der Ermittlung von Adaptionenpotenzialen und der Bewertung von Produktionsstrukturen im Rahmen eines Regelkreises zur Strukturbeurteilung
- Verwendung der vorhandenen betrieblichen Datenbasis durch Rückgriff auf typische produktionslogistische und wirtschaftliche Kenngrößen zur Erhöhung der Praktikabilität

Abbildung 4-2 zeigt die zusammenfassende Einordnung der Arbeit. Ausgehend vom soziotechnischen Wesen komplexer Produktionssysteme der variantenreichen Serienfertigung und der Charakterisierung des volatilen Umfeldes mit den daraus resultierenden divergenten Anforderungen liegt der Fokus auf der Beherrschung des Systems durch den Einsatz strukturprüfender Regelkreise. Zur iterativen Verknüpfung des Planungs- und Betriebszyklus soll eine Methodik zur Beurteilung der unterschiedlichen Strukturdimensionen vor dem Hintergrund des definierten betrieblichen Zielsystems entwickelt werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Identifikation einer Systemkonfiguration, die sowohl eine effiziente Funktionserfüllung als auch den Erhalt der systemischen Funktion bei Variation der Produktionsaufgabe und bei Auftreten von Störfaktoren garantiert. Zu diesem Zweck wird eine kontinuierliche sowie anlassbezogene Strukturüberprüfung im Kontext veränderungsfähiger Produktionssysteme angestrebt. Durch die Berücksichtigung und Operationalisierung der dichotomen Ziele Resilienz und Effizienz soll ein nachhaltiges Wirtschaften des Unternehmens gewährleistet werden.

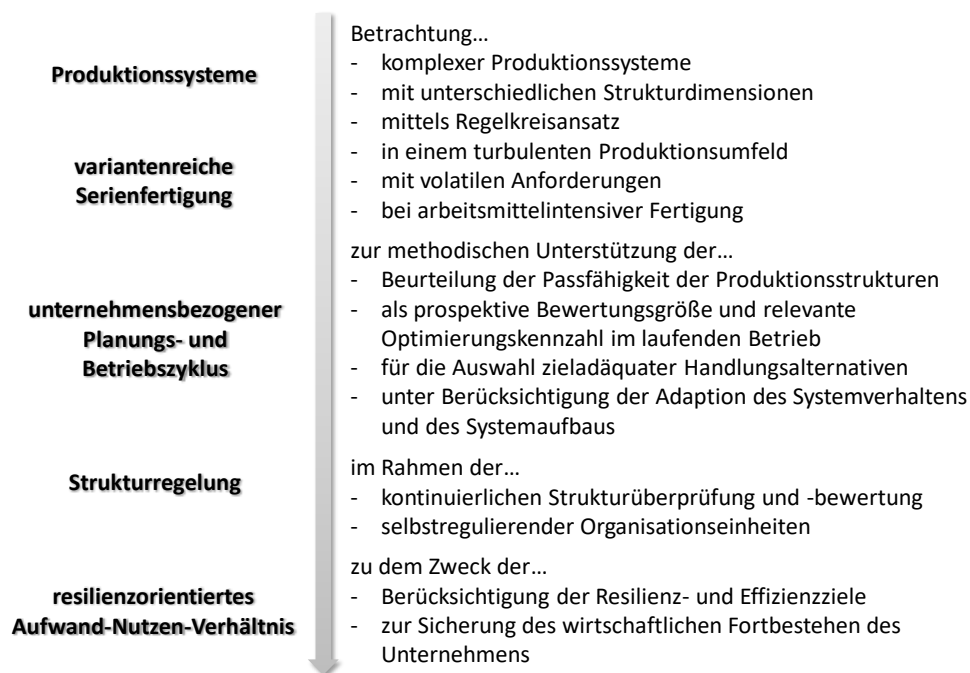


Abbildung 4-2: Zusammenfassende Einordnung der Arbeit

5 Beurteilung des Veränderungsbedarfs von Produktionsstrukturen

Vor dem Hintergrund der Beurteilung von Veränderungsbedarfen für bestehende Produktionsstrukturen erfolgt in diesem Kapitel die Betrachtung der beiden wesentlichen Variabilitätstreiber, die Produktionssysteme der variantenreichen Serienfertigung grundsätzlich zu bewältigen haben. Dies betrifft zum einen die aus externen Turbulenzen resultierenden Fluktuationen der Kundennachfrage, die sich als *Variationen* des Produktionsprogramms niederschlagen, und zum anderen die störungsinduzierten *Abweichungen*, die im System auftreten und gegenüber denen jeweils eine gewisse Robustheit bzw. *Resilienz* angestrebt wird.

Insofern bedingt eine hohe Variabilität der internen und externen Produktionsbedingungen ein entsprechendes Maß an Resilienz des Produktionssystems. Um tendenzielle Veränderungen der systemischen Anforderungen frühzeitig zu erkennen, bedarf es geeigneter Kenngrößen, die das Ausmaß sowohl der störungsbedingten Variationen des Systemverhaltens als auch der turbulenzinduzierten Fluktuationen der Marktentwicklung erfassen. Auf der einen Seite erfordert die Berücksichtigung der internen Abweichungen eine kontinuierliche Auswertung. Andererseits führen Änderungen des Produktionsprogramms zu einer ereignisorientierten Prüfung der Leistungsanforderungen, die an die Produktionsstruktur gestellt werden.

Im Mittelpunkt des methodischen Ansatzes stehen nachfolgend die wesentlichen Auslöser zur Beurteilung von Produktionsstrukturen (Abbildung 5-1). Allgemeine Entwicklungen des Unternehmensumfelds (z. B. geänderte Kostenstruktur der Potenzialfaktoren Mensch, Maschine bzw. Material) ziehen eine potenzielle Anpassung des unternehmenseigenen Zielsystems nach sich, um den veränderten Randbedingungen Rechnung zu tragen und die eigene Wettbewerbsposition aufrecht zu erhalten oder sogar auszubauen. Dadurch ändert sich die betriebliche Bewertungsgrundlage der Konfiguration des Produktionssystems und seiner Strukturen. Auf Grund der Opazität des Unternehmensumfeldes und der betrieblichen Entscheidung für bestimmte Produktionsstrategien und -ziele wird dieser Aspekt im Fortgang allerdings nur am Rande beleuchtet.

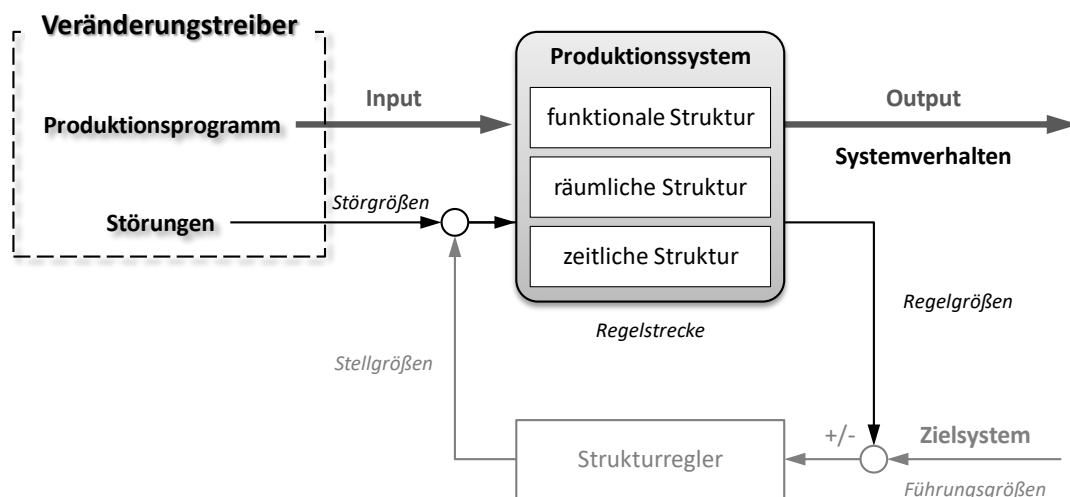


Abbildung 5-1: Auslöser der Überprüfung von Produktionsstrukturen

Hingegen bewirkt ein konkreter Wandel bei der Kundennachfrage in qualitativer oder quantitativer Hinsicht bzw. bezüglich der jeweiligen Zeitfunktion des Bedarfs direkt tangible Verschiebungen des Produktionsprogramms. Dies hat eine entsprechende Änderung des betrieblichen Belastungsprofils zur Folge (**Änderung des Inputs**).

Neben einem lebenszyklusbedingten oder innovationsgetriebenen Wechsel von Arbeitsmitteln, Fertigungstechnologien oder Produktionsprozessen, sorgt vor allem das Auftreten zufälliger Störungen für eine ungewünschte Veränderung der bestehenden Produktionsstrukturen. Letzteres zieht in der Regel eine negative Änderung des Kapazitätsprofils des Produktionssystems nach sich, was mit veränderten Eigenschaften hinsichtlich des systemischen Leistungspotenzials einhergeht (**Änderung der Regelstrecke**). Diese werden zumeist anhand eines geänderten Systemverhaltens bzw. entsprechender Ausprägungen der Regelgrößen evident.

Vor diesem Hintergrund stehen die beiden wesentlichen Blickwinkel bei der Betrachtung von Systemkonfigurationen hinsichtlich ihres wirtschaftlichen Fortbestehens im Vordergrund. Dies betrifft die Beurteilung zum einen der zielsystembezogenen Passfähigkeit bzw. Eignung einer Produktionsstruktur angesichts variierender Produktionsaufgaben sowie zum anderen der Resilienz von Produktionssystemen insbesondere infolge auftretender Störereignisse während der Betriebsphase. Im ersten Fall werden die funktionalen, räumlichen und zeitlichen Struktur Aspekte mit Blick auf ein sich änderndes Produktionsprogramm beleuchtet. Ferner erfolgt die Ermittlung der Auswirkungen von Störsituationen und resultierenden Abweichungen vom ursprünglichen Produktionsplan im Sinne des Resilienz-Begriffs. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse können nachfolgend der Veränderungsbedarf und somit die Notwendigkeit des Ergreifens adäquater Maßnahmen zur Strukturadaption abgeleitet werden.

Die **Eignung** einer Produktionsstruktur entspricht im Rahmen dieser Arbeit ihrer Fähigkeit zur effizienten Funktionsausübung, d. h. der Leistungsstabilität im angestrebten Betriebspunkt hinsichtlich der Bewältigung eines definierten Produktionsprogramms. Infolgedessen berücksichtigt sie die Erfüllung der angestrebten Planungsprämissen für das Produktionssystem (Effektivität) und gibt zudem Auskunft darüber, wie sich die Qualität der formalen Zielerreichung gestaltet (Effizienz). Dabei bezieht sich das Vermögen zur Erfüllung der anstehenden Produktionsaufgabe auf die Durchführbarkeit des Produktionsprogramms (Suffizienz) und beruht damit auf dem aus der Systemzusammensetzung (funktionale Struktur) resultierenden Potenzial. Die räumlichen und zeitlichen Strukturdimensionen bestimmen hingegen die Qualität der Funktionsausübung. Insofern drückt die Eignung als Kombination von Effektivität und Effizienz die Güte einer strukturellen Konfiguration hinsichtlich ihrer Passfähigkeit zum anstehenden Produktionsprogramm einhergehend mit der Wirtschaftlichkeit des Betriebsmodus aus. Bei Veränderungen der Leistungsanforderungen (Produktionsprogramm) ist daher die Eignung der zugrundeliegenden Produktionsstruktur sicherzustellen, um eben jene effiziente Funktionserfüllung zu gewährleisten.

Die **Resilienz** zielt hingegen auf den Erhalt der Funktionalität des Produktionssystems ab. In diesem Kontext bezieht sich die Robustheit auf das systemische Vermögen, die bestehende Leistungsfähigkeit (definierte Funktionalität) trotz einwirkender Veränderungstreiber aufrecht zu erhalten. Hierbei steht folglich die Absicherung der Effektivität im Mittelpunkt. Resilienz erweitert die Robustheitseigenschaft um die Agilitätskomponente, d. h. die Fähigkeit des Systems zur Anpassung seiner Struktur, so dass ggf. auch eine veränderte Leistung im Rahmen eines alternativen Betriebspunktes erbracht wird. Dabei weisen resiliente Produktionssysteme stets auch zur Erfüllung der Produktionsaufgabe geeignete Strukturen auf (Planungsprämissen: Effektivität). Speziell bei störungsbedingter Veränderung der strukturellen Konfiguration des Produktionssystems stellt die Resilienz somit ein Maß dafür dar, wie schnell und zu welchem Grad das System zu seiner ursprünglichen Leistungsfähigkeit zurückkehren kann.

5.1 Beurteilung der Eignung von Produktionsstrukturen

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen turbulenter Umweltveränderungen auf die Produktionsstrukturen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zur Umsetzung der daraus resultierenden Produktionsaufgaben ereignisorientiert bewertet.

Änderungen der Eingangs- und Umweltbedingungen eines Produktionssystems wirken sich auf das Produktionsprogramm aus. Durch Veränderungen bei den zu erstellenden Produktvarianten und ihrer Zusammensetzung nach Art (Produktmix bzw. Auftragszusammensetzung) und Menge (Mengenmix bzw. Produktionsvolumen je Auftrag sowie Gesamtproduktionsvolumen) im laufenden Auftragseingang ergeben sich die stärksten Impulse zur Überprüfung der Stimmigkeit der Struktur mit dem Aufgabenfeld. Wenn es zu Verschiebungen im Produktionsprogramm kommt, verändert sich die Bewertungsgrundlage der Leistungserbringung, da sich die Produktionsaufgabe und damit die gestellten Anforderungen ändern. Daher ist die Effizienz und Effektivität (Funktionserfüllung) des Produktionssystems stets vor dem Hintergrund der jeweiligen Produktionsaufgabe zu beurteilen. Dies bedingt eine anlassbezogene Beurteilung der Verschiebungen des Produktionsprogramms als potenzieller Auslöser von eignungsbezogenen Veränderungen der Produktionsstruktur (Abbildung 5-2).

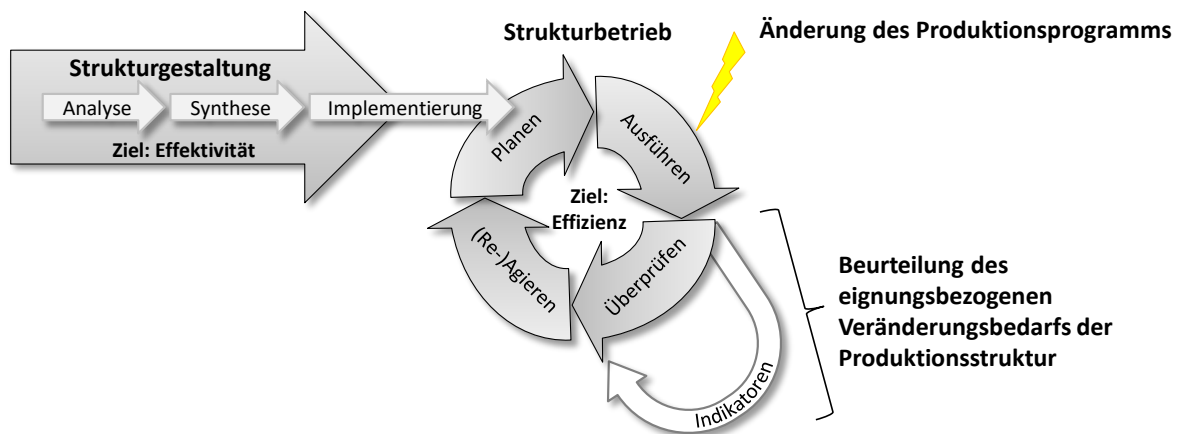


Abbildung 5-2: Überprüfung der Eignung einer Produktionsstruktur

Daher erfolgt zunächst die Definition von Kennzahlen zur Beurteilung der Eignung der bestehenden Strukturdimensionen des Produktionssystems. Hierbei wird ein pragmatischer Ansatz zur strukturellen Prüfung gewählt, der vorrangig Informationen verwendet, die sich direkt im Produktionsprogramm bzw. implizit in den abgeleiteten Arbeitsplänen für die einzelnen Aufträge wiederfinden. Die indikatorbasierte Prüfung des Veränderungsbedarfs fußt dabei jeweils auf prospektiv erfassbaren Kenngrößen.

5.1.1 Überprüfen der funktionalen Struktur

Die Überprüfung der Zuordnung von Aufträgen bzw. Produkten zu Organisationseinheiten und damit die Bildung von Struktureinheiten stellt insofern eine Klammerfunktion der strukturellen Bewertung dar, als dass dadurch die kapazitive Arbeitsteilung zwischen den einzelnen Produktionssystemen in der Produktionsstätte strategisch festgelegt wird. Erst anschließend sind Aussagen zur Eignung der räumlichen oder zeitlichen Strukturebene möglich.

Eine Ausrichtung der funktionalen Produktionsstruktur auf Grund einer unterschiedlichen Charakteristik der produktbezogenen Bedarfssituation führt zu einer Segmentierung der Produktion in Renner (Mengenfokus) und Exoten (Vielfaltsfokus). Die Unterscheidung hinsichtlich einer Produktspezifik erfordert eine gewisse Teilevielfalt (mindestens 2 Produkte) mit divergenter Kontinuität und konträren Auftragsvolumina (Disproportionalität), d. h. die Grobstrukturierung erfolgt in erster Linie nach der Fertigungsart. Die Bildung von Organisationseinheiten soll dabei streng alternativ nach Mengengesichtspunkten oder Vielfaltsanforderungen erfolgen - niemals jedoch vermischt werden [WARN92]. Sowohl die Bewertung von Mengen- als auch von Produktänderungen innerhalb des Produktionsprogramms sind damit von zentraler Bedeutung für die Überprüfung dieser Strukturdimension.

Daher erfolgt die Beurteilung der funktionalen Struktur zum einen über den Mengen- (MI) und zum anderen über den Vielfaltsindex (VI). Beides sind Indikatoren, die fortwährend erhoben und ausgewertet werden können.

Der **Mengenindex** gibt an, wie viele Erzeugnisse durchschnittlich je Auftrag im Betrachtungszeitraum (i. d. R. ein Jahr) herzustellen sind. Damit orientiert sich diese Maßzahl an der mittleren Losgröße [BURK84]. Es handelt sich hierbei um eine stückzahlorientierte Kenngröße. Das mittlere Auftragsvolumen (Mengenindex), kombiniert mit dem dazugehörigen Variationskoeffizienten, drückt den Mengemix eines Produktionsprogramms aus.

Der **Vielfaltsindex** repräsentiert mit der Anzahl unterschiedlicher Produkte bzw. Aufträge je Periode die Variantenanzahl einer Organisationseinheit (Produktmix). Hier können nominell verschiedenartige Aufträge auf Grund ihrer ablaufbezogenen Systembelastung durchaus in Form gleicher Teilefamilien zusammengefasst werden. Somit beurteilt der Vielfaltsindex gleichzeitig die Ähnlichkeit der Produktionsprozesse und die produktbezogene Arbeitsbelastung für jedes Arbeitssystem. Entsprechend fußt dieser Indikator auf einer vorherigen Gruppierung der Erzeugnisse in Form von Produktionsablauffamilien.

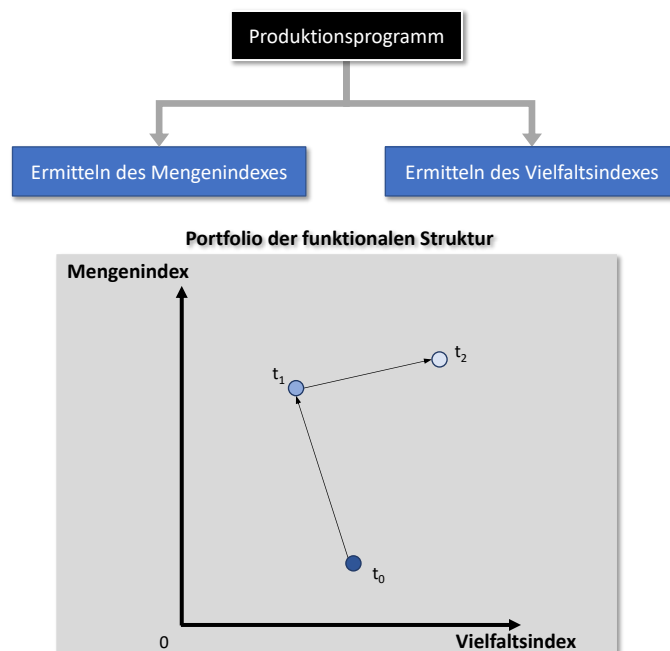


Abbildung 5-3: Indikatoren für die Prüfung der funktionalen Struktur

Sobald sich der Trend der Kenngrößen ändert (Abbildung 5-3), ist die Strukturierung der Leistungseinheiten und damit ihr Vielfalts- oder Mengenfokus zu überdenken. Mit zunehmender Vielfalt des Produktspektrums steigt tendenziell auch der Steuerungsaufwand im Produktionssystem auf Grund divergenter Materialdispositionen und Leistungsanforderungen. Infolgedessen sind unterschiedliche Auftragspapiere wie Stücklisten, Arbeits- und Prüfpläne und Begleitkarten zu erstellen. Ein Anstieg der Produktionsmenge bei gleicher Variantenzahl wirkt sich – jenseits des Erreichens der Kapazitätsgrenzen des Produktionssystems – hingegen kaum aufwandserhöhend auf die Planungs- und Steuerungsprozesse aus. Ein steigender Mengenindex deutet bei gleichzeitig sinkendem Vielfaltsindex auf eine Konzentration des Produktionsprogramms auf eine geringer werdende Anzahl eher homogener Produktarten hin. Die Homogenität wird insbesondere durch eine Reduktion des stückzahlorientierten

Variationskoeffizienten sowie der Variantenzahl ausgedrückt. Dahingegen tendiert die betrachtete Organisationseinheit bei entgegengesetzter Entwicklung zu einem breiteren und heterogeneren Produktspektrum.

Somit wird unter Anwendung der vorgestellten Indikatoren eine maßgebliche Charakterisierung des Produktionsprogramms und seiner Änderung vollzogen, die sowohl den Mengen- als auch den Produktmix berücksichtigt und sich an die Kategorisierung in Abschnitt 2.3.1 anlehnt.

5.1.2 Überprüfen der räumlichen Struktur

Da eine Veränderung der Intensität und der prinzipiellen Ausrichtung der Beziehungen (Konnektivität der Ressourcenelemente) unabhängig von der Anzahl der vorhandenen Arbeitsmittel (Varietät der Ressourcenelemente) auf den Trend einer potenziellen räumlichen Strukturveränderung schließen lässt (vgl. [LÜCK99]), werden im Fortgang geeignete Kenngrößen zur Analyse eben jener Aspekte abgeleitet. Für die indikatorbasierte Beurteilung der Aufbaustruktur ist es daher zunächst erforderlich, ein Maß für die intensitätsorientierte Konnektivität der Ressourcenelemente und einen Ausdruck der Gerichtetheit des Teiledurchlaufs heranzuziehen (Abbildung 5-4). Die Datenbasis dafür bildet die Materialflussmatrix.

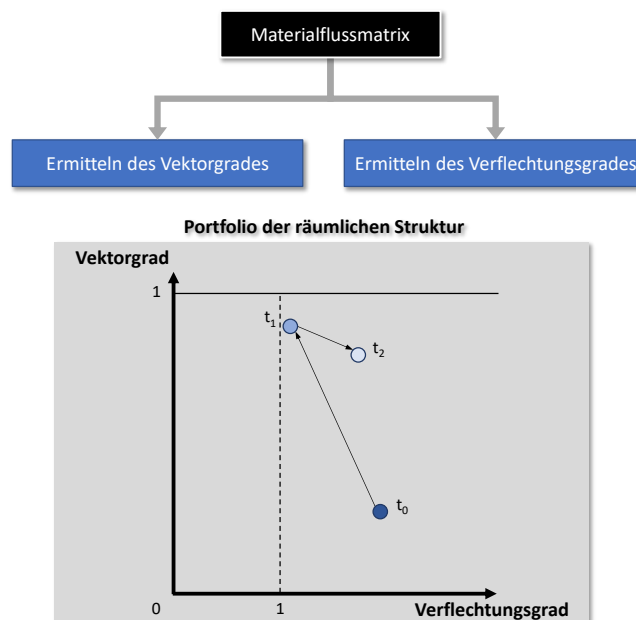


Abbildung 5-4: Indikatoren für die Prüfung der räumlichen Struktur

Der **Verflechtungsgrad X**, der die Beziehungsvielfalt eines Materialflusssystemes charakterisiert, orientiert sich am Kooperationsgrad nach Schmigalla [SCHM70]. Allerdings wird er erweitert, so dass zum einen die Verbindungen zum Wareneingang und -ausgang der Leistungseinheit Berücksichtigung finden. Dies erscheint erforderlich, um fremdbezogene Fertigungsumfänge und extern durchgeführte Arbeitsvorgänge adäquat einzubeziehen. Die Intensität der Beziehungen kann über die Anzahl der Aufträge oder Einzelteile je Betrachtungszeitraum oder ihrem jeweiligen aggregierten zeitlichen Arbeitsvorrat ausgedrückt werden. Bei Verwendung des reinen Kooperationsgrades oder des verwandten Desintegrationsgrades (vgl. [SAIN75]) steigt der jeweilige Zahlenwert mit der Anzahl der verbundenen Elemente (m) überproportional an, da die Verknüpfungsmöglichkeiten n nichtlinear – um den Faktor $m \cdot (m - 1)$ – zunehmen.

Um eine klare Tendenz zwischen den beiden grundsätzlichen räumlichen Strukturtypen, der Linie bzw. Reihe und dem Netz bzw. der Werkstatt, zu verdeutlichen und gleichzeitig der Disproportionalität der

Konnektivität in Abhängigkeit von der Elementemenge Rechnung zu tragen, erfolgt zum anderen eine Normierung der von Schmigalla logisch abgeleiteten oberen Grenze einer Reihenstruktur ($\kappa_{RS,o}$) auf den Wert 1 und der unteren Grenze einer Reihenstruktur ($\kappa_{RS,u}$) auf den Wert 0 (vgl. [SCHM70]):

$$\kappa_{RS,o}(m) = 4 - \frac{6}{m} \text{ mit } m - \text{Anzahl der Ressourcenelemente, wobei } \lim_{m \rightarrow \infty} \left(4 - \frac{6}{m}\right) = 4$$

$$\kappa_{RS,u}(m) = 2 - \frac{2}{m} \text{ mit } m - \text{Anzahl der Ressourcenelemente, wobei } \lim_{m \rightarrow \infty} \left(2 - \frac{2}{m}\right) = 2$$

Somit ergibt sich als Berechnungsformel für den Verflechtungsgrad X :

$$X = \frac{\kappa(n, m) - \kappa_{RS,u}(m)}{\kappa_{RS,o}(m) - \kappa_{RS,u}(m)}, \text{ mit } \kappa - \text{Kooperationsgrad und } n - \text{Anzahl der Verbindungen}$$

(einschl. Warenein- und -ausgang)

Fällt die Anzahl der Materialflussverbindungen unter den Wert $\kappa_{RS,o}$ ($X < 1$), tendiert die Strukturlösung zu einer linienförmigen Topologie. Ergibt sich ein höherer Zahlenwert, liegt eher eine stärker vernetzte Aufbaustruktur vor. Eine Veränderung der relativen Werte (Proportionen der Materialflussintensitäten) führt zur Änderung der Kennzahl (Verflechtungsgrad) jeweils in Abhängigkeit der Anzahl der Ressourcenelemente m .

Als Maß für einen gerichteten Teiledurchlauf, d. h. eine richtungsgebundene Losweitergabe ohne Rückflüsse, dient nachfolgend der **Vektorgrad P** . Dabei wird auf den Richtungskoeffizienten nach Büchel [BÜCH68] zurückgegriffen. Allerdings stehen hierbei nicht die booleschen Verbindungen im Mittelpunkt, sondern deren konkrete Intensitäten. Ausgehend von einer erfahrungsgelernt aufgestellten Materialflussmatrix und einer darin implizit vorausgesetzten logischen (gesamtsystemischen) Reihenfolge der einzelnen Kapazitäten wird die Transportintensität der dieser Sequenz folgenden Verknüpfungen (oberhalb der Diagonale) mit denen in entgegengesetzter Richtung (unterhalb der Diagonale) folgendermaßen ins Verhältnis gesetzt:

$$P = \frac{Tl_r - Tl_e}{Tl_r + Tl_e}, \text{ mit } \begin{array}{l} Tl_r - \text{summarische Transportintensitäten in Materialflussrichtung} \\ Tl_e - \text{summarische Transportintensitäten entgegen der Materialflussrichtung} \end{array}$$

Liegen keinerlei Rückflüsse vor, beträgt der Vektorgrad 1. Dies spricht auf Grund der prinzipiellen Orientierung des Materialflusses eher für eine Linienstruktur. Jedoch wäre auch eine gerichtete Werkstattstruktur denkbar (vgl. [SAIN75]). Existieren genauso viele Transportintensitäten entgegen wie in Gesamtmaterialflussrichtung ergibt sich ein Wert von 0. Dies entspricht der theoretischen Vorstellung einer bidirektional vollständig vernetzten Werkstattstruktur (vgl. [SCHM70]).

Die indikatorbasierte Strukturbeurteilung fußt somit auf zwei Kenngrößen, die sich aus der statischen Materialflussmatrix einer Leistungseinheit für eine definierte Planungsperiode ableiten lassen. Deutet die zeitliche Entwicklung beider Indikatoren auf eine substantielle Veränderung, d. h. den Wechsel des Strukturtyps, hin, ist eine Bewertung der Güte der vorliegenden räumlichen Struktur vorzunehmen.

5.1.3 Überprüfen der zeitlichen Struktur

Da die Ablaufstruktur über unterschiedliche Kenngrößen charakterisiert werden kann, liegt der Fokus zur Auswahl geeigneter Indikatoren auf der Untersuchung des Belastungszugangs (Bedarfsverlauf) unter Berücksichtigung der Charakterisierung des Produktionsprogramms hinsichtlich des Produkt- und Mengenmixes. Dies erleichtert die prospektive Beurteilung, da es einen Rückgriff auf vorhandene Informationen ermöglicht.

Die bloße mittlere Anzahl an Aufträgen pro Periode ist mit Hinblick auf das inputseitige Zeitverhalten wenig aussagekräftig. Bei grundsätzlicher Befähigung des Produktionssystems zur Bewältigung des an-

stehenden Leistungsprogramms (Produktionsprogramm) charakterisiert vielmehr die auftragsinduzierte **durchschnittliche Systembelastung M** als Erwartungswert (μ) der Ausführungszeit (ZAU) die dynamische Basis der Lastsituation. Durch die Zeitrumbetrachtung kombiniert sie den Mengenmix der Produktionsaufgabe und die Intervalle der konkreten Kundenbedarfe. Werden beide Aspekte differenziert, ergibt sich auf der einen Seite die Belastung (Arbeitsvorrat) je Auftrag (ZAU_i) sowie die mittlere Zeitspanne zwischen den jeweiligen Kundenaufträgen. Doch erst bei aggregierter Betrachtung wird das Ausmaß für das Gesamtsystem ersichtlich, wobei die Wahl des geeigneten Analysezeitraums entscheidend für den Aussagegehalt ist (vgl. Abschnitt 2.3.2).

$$M = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n ZAU_i, \text{ mit } n - \text{Anzahl der unterschiedlichen Produktarten } i$$

Des Weiteren wird im Fortgang auf die arbeitssystembezogene Streuung des Bedarfsverlaufs zurückgegriffen, da diese eine zuverlässige Auskunft über die aus einem veränderten Produkt- und/oder Mengenmix resultierende Variabilität der Einlastung gibt. Grundlage der Kenngröße bilden die auftragsbezogenen Ausführungszeiten. Als Streuungsmaß dient der **Variationskoeffizient Δ** (relative Standardabweichung), der das Verhältnis von Standardabweichung zum Erwartungswert angibt und somit eine normierte Maßzahl darstellt.

$$\Delta = \frac{\text{Standardabweichung } \sigma}{\text{Erwartungswert } \mu}$$

Die Standardabweichung drückt dabei allgemein aus, wie weit die Einzelwerte im Durchschnitt vom (planerischen) Erwartungswert der Belastung entfernt sind. Durch Kombination von mittlerer Belastung und Variationskoeffizient kann eine Aussage hinsichtlich der Proportionalität der auftragsbezogenen Arbeitsaufwände innerhalb der betrachteten Leistungseinheit getroffen werden.

Im Gegensatz zum Vielfaltsindex, der im Rahmen der Beurteilung der funktionalen Strukturierung die Ähnlichkeit der Produktionsprozesse und deren Arbeitsbelastung für jedes Arbeitssystem vergleicht, repräsentiert der Variationskoeffizient der zeitlichen Struktur die Belastungsschwankungen für die gesamte Leistungseinheit.

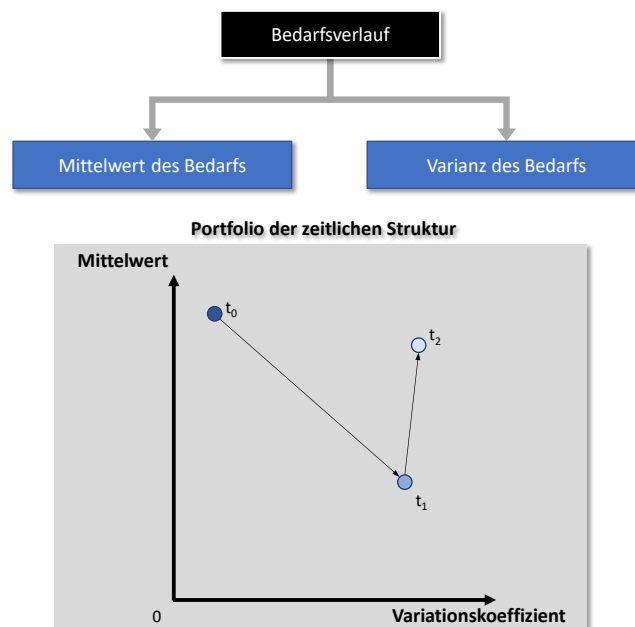


Abbildung 5-5: Indikatoren für die Prüfung der zeitlichen Struktur

Die Analyse der Ablaufstruktur erfolgt somit zugangsbasiert über die mittlere Belastung der Leistungseinheit und dem zugehörigen Variationskoeffizienten (Abbildung 5-5).

5.2 Beurteilung der Resilienz von Produktionsstrukturen

Vor dem Hintergrund eines veränderten Produktionsprogramms oder einer störungsbedingten Änderung der Produktionsstruktur und resultierenden Abweichungen von der gewünschten Funktionserfüllung erfolgt im Fortgang die retrospektive Beurteilung, ob sich die Systemkonfiguration noch ausreichend resilient verhält, um ihre immanente Funktionalität zu erhalten (Abbildung 5-6). Dazu dient eine kontinuierliche Überwachung der Ergebnisgrößen (Output bzw. Regelgrößen), die das Systemverhalten charakterisieren und im Zuge der Produktionsregelung ohnehin fortwährend erfasst werden. Dies ermöglicht die Ermittlung zum einen der Robustheit und zum anderen der Agilität. Auf Basis dieser beiden Kernaspekte erfolgt anschließend die Operationalisierung und Berechnung der Resilienz.

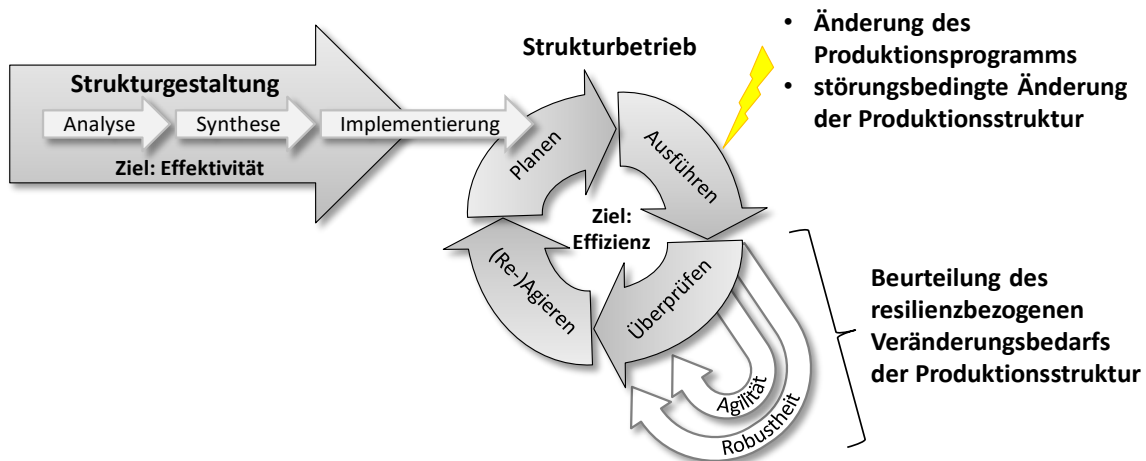


Abbildung 5-6: Überprüfung der Resilienz einer Produktionsstruktur

5.2.1 Kontinuierliche Strukturüberwachung

Die produktionslogistischen Kenngrößen repräsentieren adäquate Wertmaßstäbe zur Beurteilung des Verhaltens von Produktionssystemen und somit der summarischen Ergebnisse der Herstellprozesse (Abschnitt 3.2.3).

Die kontinuierliche Strukturüberwachung im Sinne einer fortlaufenden Diagnose von erforderlichen Eingriffen auf Basis von steuerungsrelevanten Planabweichungen sollte anhand der vorgestellten Ergebnisgrößen erfolgen, da erst sie eine hinreichend genaue Aussage über das tatsächliche Systemverhalten und damit über die betriebliche Zielerreichung erlauben. Als maßgebliche Kenngrößen dienen im Fortgang die Durchlaufzeit, der Umlaufbestand und die Leistung [NYHU12], [LÖDD08]. Da die Termintreue wesentlich von der Güte der Produktionsplanung und der definierten Fertigstellungstermine abhängt, findet sie nachfolgend keine Berücksichtigung. Zwar ähnelt das Vorgehen der Auftragsüberwachung, jedoch erfolgt bei der Strukturprüfung keine Verfolgung einzelner Aufträge, sondern eine Abbildung des systemischen Verhaltens.

Vor diesem Hintergrund sind die einzelnen Maßzahlen in ihrem Zeitverlauf unter Angabe eines Erwartungswertes (langfristiger Planwert) sowie angemessener Eingriffsgrenzen zu verfolgen und zu analysieren (Abbildung 5-7). Als Orientierungsgröße kann hierbei entweder das langfristige Mittel (Jahresdurchschnitt) oder der Median (mittlere Ausprägung aller vorkommenden Werte) dienen. Weiterhin ist es mitunter sinnvoll, für die Messwerte auf den gleitenden Mittelwert eines definierten Betrachtungszeitraums zurückzugreifen, um die Effekte einmaliger Ausreißer abzumildern. Die Abweichung vom planerischen Wert signalisiert die Tendenz einer unterschweligen allmählichen oder abrupten

Veränderung der summarischen Auftragssituation bzw. die Auswirkung vorhandener Störfaktoren. Anhand der sich ändernden Ergebnisgrößen, die sich aus einem situativen Systemverhalten ergeben, kann die Erfordernis einer strukturellen Anpassung ermittelt werden.

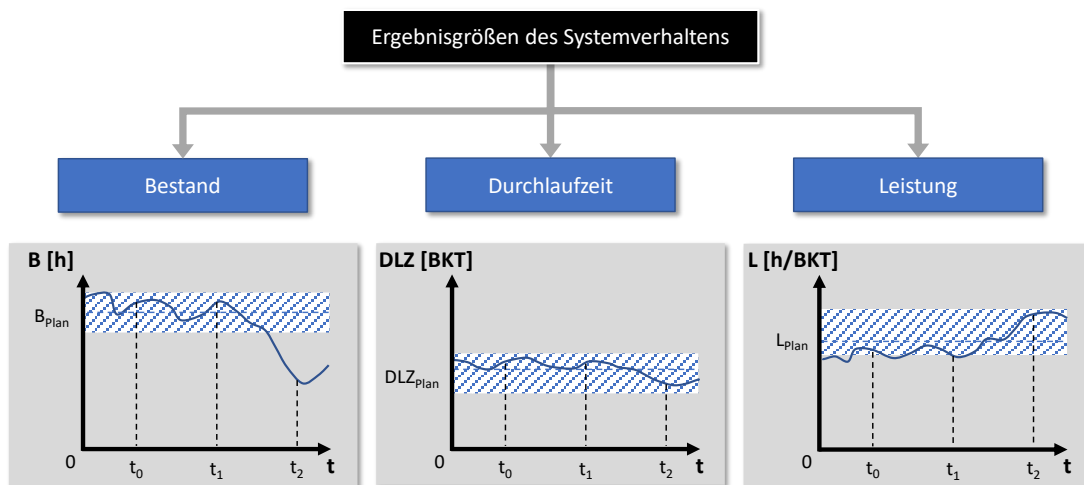


Abbildung 5-7: Kennzahlen für die Überwachung des Systemverhaltens

Hierbei ist zu beachten, dass der identifizierte Trend der Abweichung stabil sein muss, d. h. er sollte über einen ausreichend großen Zeitraum konstant fortbestehen. Des Weiteren hat der Grad des Änderungsbedarfs ein bestimmtes Mindestniveau zu erreichen (Über-/Unterschreiten definierter Toleranzgrenzen), bevor eine Anpassung in Erwägung gezogen wird. Die Vorgaben zur zeitlichen Dauer der tendenziellen Entwicklung und ihrer Auswirkungen sollen eine permanente kurzzyklische Strukturveränderung einhergehend mit einem ständigen Anlauf- und Gewöhnungsaufwand (Verlieren von Lerneffekten) vermeiden, da diese die Dynamik des Produktionsumfeldes unmittelbar in eine turbulente Auftragsbearbeitung überführen würde.

5.2.2 Ermittlung der leistungsorientierten Resilienz

Die Funktionsfähigkeit eines Produktionssystems betrifft vor allem die Erbringung einer bestimmten Leistung und damit das Systemverhalten im Betrieb. Wird nun Robustheit als Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit bzw. Funktionserfüllung eines Systems definiert (vgl. [TIER07]), rückt die Betrachtung der leistungsorientierten Effektivität in den Mittelpunkt. Eine robuste Konfiguration gewährleistet somit vorrangig einen definierten Durchsatz bzw. eine vorgegebene arbeitsvorratsbezogene Leistung.

Störungen bzw. Beeinträchtigungen führen zur Verminderung der Funktionserfüllung, weil sie zwangsläufig die geplante Ausführung des Systemverhaltens einschränken (vgl. Abschnitt 2.3.2). Es zeigen sich auf Grund dessen Auswirkungen auf die Systemzusammensetzung (Art und Anzahl bzw. Verfügbarkeit der Ressourcenelemente), den Aufbau (räumliche Struktur) und das Verhalten des Systems (zeitliche Struktur) dahingehend, dass die ursprüngliche Funktionalität des Produktionssystems zumeist kapazitiv reduziert wird (Störstruktur).

Da sich die ex ante festgelegte Robustheit in ihrer konkreten Ausprägung erst bei einem veränderten Umfeld oder einwirkenden Störungen zeigt und bewerten lässt, kann sie insofern als Grad der Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit, d. h. verbliebener Durchsatz oder restliches Leistungsniveau, angesehen werden. Daher sind zu ihrer Beurteilung Kennzahlen heranzuziehen, die das relative Maß der bewahrten Funktionalität (verbliebenes Leistungsniveau) objektiv erfassen. Gleichzeitig repräsentiert die Rest-Leistungsfähigkeit als Bewertungsgröße für die Robustheit den Intensitätsaspekt der

Resilienz bzw. die Störungswirkung. Insofern dient der abgearbeitete Arbeitsvorrat pro Periode im Fortgang als wesentliche Maßzahl für das Aufrechterhalten der Funktionsfähigkeit im Resilienz-Sinne bzw. den verbliebenden Grad der Funktionserfüllung einer Störstruktur. Dadurch liegt der Fokus folglich auf der Robustheit der Durchsatzfunktion des Produktionssystems mit der Leistung (abgearbeiteter Arbeitsvorrat) als zentrales Effektivitätskriterium.

Eine agile Strukturadaption ex post bezweckt auf Basis einer Analyse der Ursachen für die Beeinträchtigung die Wiederherstellung einer definierten Leistungsfähigkeit. Somit prägt die Agilität den funktionalen Zusammenhang zwischen Zeit und Intensität bei der Rückkehr zu einer stabilen Leistungserbringung. Sie wird folglich über die Dauer der Erholung des Systems und dem Grad des Zurückerlangens des ursprünglichen Leistungsniveaus charakterisiert. Unter Berücksichtigung dieser zeitlichen und intensitätsmäßigen Komponenten stellt folglich die Erholungsgeschwindigkeit die maßgebliche Kenngröße der Agilität dar.

Werden beide Artefakte subsummiert, entspricht dies der Resilienz des Systems, weil es somit in der Lage ist, trotz geänderter Umweltsituation oder einwirkenden Störfaktoren seine vorgesehene Funktionalität ggf. durch strukturelle Anpassung beizubehalten oder einen alternativen Betriebsmodus einzunehmen. Da Resilienz sowohl einen Intensitätsaspekt (Verminderung der Leistungsfähigkeit) als auch einen zeitlichen Aspekt (Dauer bis zur vollständigen oder teilweisen Erholung) beinhaltet, spiegelt sie eine dynamische Systemeigenschaft wider. Daher erscheint die gleichzeitige Betrachtung beider Dimensionen in Form eines Flächenintegrals der Leistungskennlinie zweckmäßig (Abbildung 5-8). Dies verdeutlicht, dass es sich genau genommen um keine Zustands-, sondern vielmehr um eine Verhaltensbeurteilung handelt.

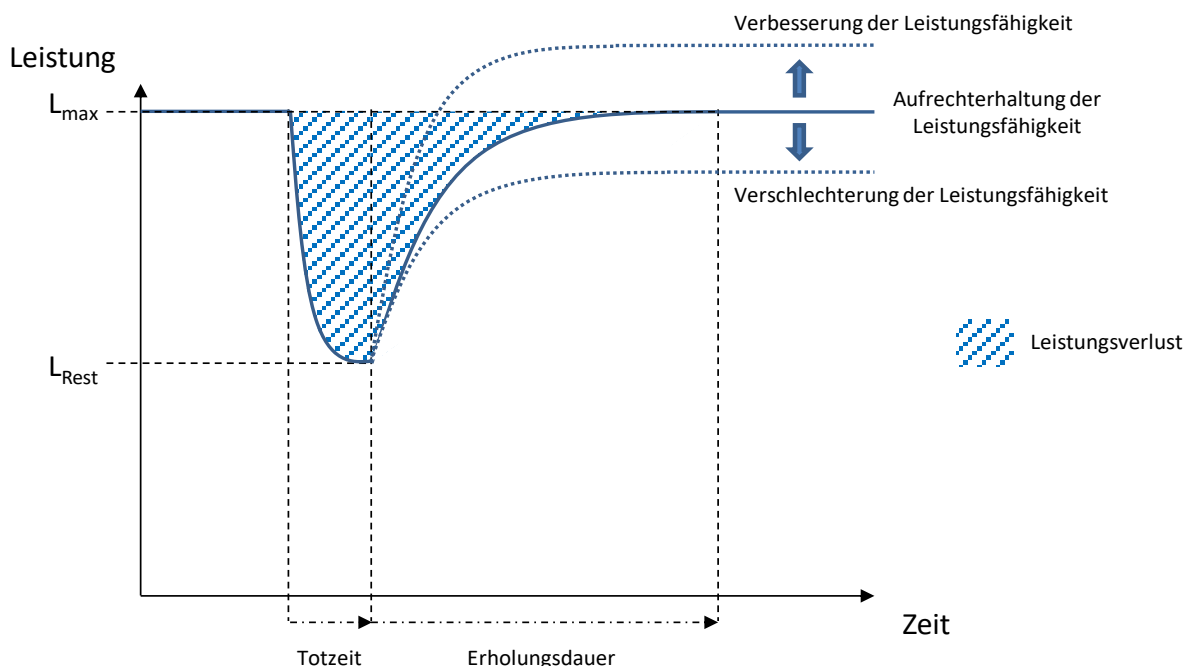


Abbildung 5-8: Leistungsorientierte Resilienzbeurteilung

Zur Spezifizierung der leistungsorientierten Resilienzbeurteilung werden die charakteristischen Kenngrößen anhand eines idealtypischen Verlaufs definiert und hervorgehoben (vgl. [DORB11], [SHEF05]). Ausgangspunkt stellt zunächst die geplante Leistungserbringung (Planungsprämisse) dar, die allgemein durch Störungsfreiheit gekennzeichnet ist. Im stabilen Zustand entspricht die Funktionalität des Systems dabei der geplanten Leistung bei zuverlässiger Funktionserfüllung (L_{\max}). Die Darstellung eines

zeitlich vollkommen unveränderten Referenzwertes dient lediglich der Vereinfachung (Abbildung 5-9). Auf Grund der Erfassungsintervalle des Leistungskennwertes treten systematisch Schwankungen innerhalb eines gewissen Toleranzbereichs auf (vgl. [BECK14]), für dessen Mittelwert der langfristige Durchschnitt oder der Median herangezogen werden sollte. In dieser Situation birgt die Produktionsstruktur bereits eine intrinsische Robustheit in sich, die jedoch nicht ersichtlich ist. Das Ausmaß an Robustheit des Produktionssystems zeigt sich erst, sollte eine zuverlässige Funktionserfüllung nicht mehr gewährleistet (vgl. [DEGO14]) und die tolerierte Schwankungsbreite überschritten sein.

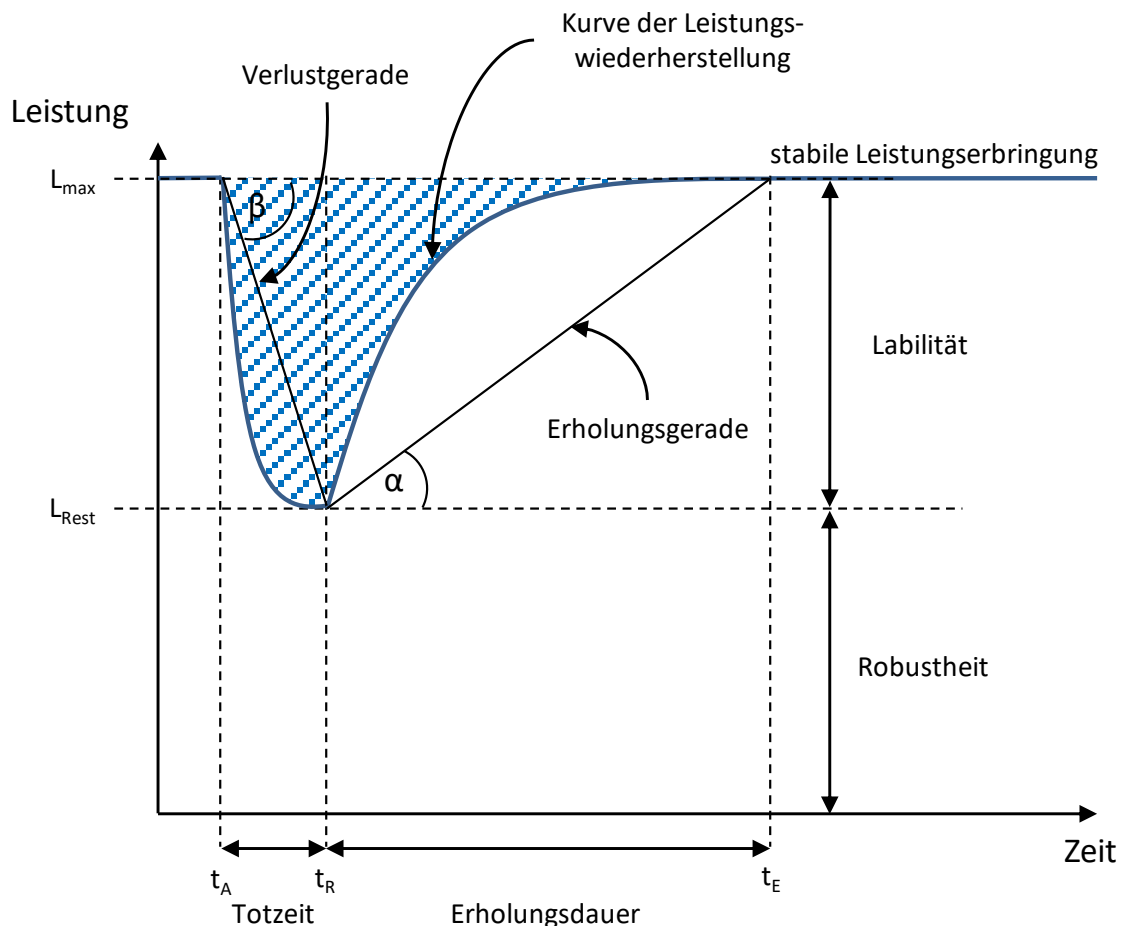


Abbildung 5-9: Kenngrößen der leistungsorientierten Resilienzbeurteilung

Aus dem Auftreten eines endogenen oder exogenen Störfaktors zum Zeitpunkt t_A resultieren Beeinträchtigungen, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Systemzusammensetzung (Ressourcenverfügbarkeit bzw. -ausfall) und das Systemverhalten (eingeschränkte bzw. verzögerte Leistungserfüllung/-erbringung) nach sich ziehen können. Sofern die systemimmanente Robustheit nicht ausreicht, um alle negativen Effekte abzufedern, hat dies in der Regel eine Reduktion der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zur Folge. Zur Vereinfachung des Sachverhalts werden nachfolgende Annahmen getroffen:

- Das Störereignis entfaltet sofort Wirkung, d. h. es existiert keine Latenzzeit zwischen Eintreten des Störereignisses und dem Eintreten der Auswirkungen. Allerdings wird der komplette Umfang der Störwirkung ggf. erst nach einer strukturspezifischen Totzeit ersichtlich.

- Das Unternehmen reagiert sofort auf das Eintreten des Störereignisses, d. h. die Störung wird unmittelbar erkannt, so dass umgehend entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.
- Solange Störungen sich nicht überlagern, existieren keine Wechselwirkungen zwischen ihnen, weshalb die Frequenz ihres Auftretens keine Rolle spielt, sondern jede separat betrachtet werden kann.

Bezieht sich die erste Annahme auf die Entfaltung der Störungswirkung, betrifft die zweite bereits die betriebliche Reaktion. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass die vorgestellte Vorgehensweise zur resilienzorientierten Strukturbewertung durch die Wahl der Kenngrößen und der Erhebungsform (kontinuierliche Überwachung des Systemverhaltens) dazu beiträgt, die Reaktionszeit hinsichtlich des Erkennens von Störereignissen und des Ergreifens von notwendigen Adaptionsmaßnahmen zu minimieren. Insofern bietet der vorliegende Dissertationsansatz methodische Unterstützung beim rechtzeitigen Einleiten von Gegenmaßnahmen. Mit Einsetzen der Beeinträchtigung erfolgt die Anwendung von Notfallmaßnahmen (erste Reaktion) mit dem Ziel, genaue Übersicht und Kontrolle über die Situation zu erlangen.

Tritt die volle Auswirkung erst mit Verzögerung ein (davor Anfangsverluste mit geringerer Ausprägung), sind schlagartig merkbare Leistungsverluste zu verzeichnen ($\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta L \rightarrow \max$). Zeigen sich die maximalen Effekte der Störung, endet die Totzeit zum Zeitpunkt t_R . Unabhängig davon, welches Ausmaß die resultierenden Beeinträchtigungen annehmen, ist die Robustheit stets durch die verbleibende (absolute) Systemleistung zu diesem Zeitpunkt (L_{Rest}) gekennzeichnet.

$$\text{Robustheit} = L_{\text{Rest}} = L(t_R)$$

Das Verhältnis von (Rest-)Leistungsfähigkeit nach einer Störung und dem Leistungsniveau im stabilen Zustand ermöglicht einen besseren Vergleich. Der derart gebildete prozentuale Wert lässt sich als Robustheitsgrad auffassen:

$$\text{Robustheitsgrad} = \frac{L_{\text{Rest}}}{L_{\text{max}}}$$

Im Umkehrschluss entspricht die Labilität (Störanfälligkeit) des Systems dem Leistungsverlust bei Auftreten einer Störung. Insofern ergibt die Addition von Störanfälligkeit und Robustheit das Leistungsniveau bei stabiler Funktionserfüllung (vgl. [DEGO14]).

Greifen die gewählten Gegenmaßnahmen, tritt allmählich eine Erholung der Leistungsfähigkeit ein. Insbesondere bei störungsbedingten Einflüssen wird eine vollständige Rückkehr zum vorherigen Niveau der Leistungserbringung angestrebt. Der konkrete Verlauf der Kurve der leistungsbezogenen Wiederherstellung/Erholung, welche die Fläche des Leistungsverlustes über die Zeit begrenzt, wird durch die strukturbedingte Resilienz des Systems maßgeblich beeinflusst (vgl. [MUNO15]).

Sobald sich wieder eine stabile Leistungserbringung einstellt, endet zum Zeitpunkt t_E die Resilienzbeurteilung hinsichtlich des betrachteten Störeinflusses. Dabei ist es grundsätzlich unerheblich, ob das vorherige Leistungsniveau vorliegt oder ein alternativer Betriebsmodus mit einer anderen Funktionsfähigkeit angenommen wird. Zur rechnerischen Vereinfachung werden nachfolgend jeweils die Erholungs- und die Verlustgerade approximiert (vgl. [DORB11]). Der Anstiegswinkel α der idealisierten Geraden der Leistungswiederherstellung (Erholungsgerade) spiegelt die Agilität wider.

$$\text{Anstieg der Leistungswiederherstellung} = \frac{\text{Leistungsverlust}}{\text{Erholungsdauer}}$$

Je größer der Anstieg ist, desto umso agiler reagiert das System. Eine differenzielle Betrachtung ermöglicht es, zu jedem Zeitpunkt die Agilität während der Erholungsphase in Form der Geschwindigkeit der Leistungswiederherstellung anzugeben.

$$\text{Agilität} = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

Die Berechnung des Anstiegs verdeutlicht dabei sowohl die zeitliche als auch die intensitätsmäßige Dimension, die in diesen Aspekt der Resilienz eingeht. Somit lässt sich die Agilität auch als Regenerationsgeschwindigkeit von Produktionsstrukturen bezeichnen. Dagegen repräsentiert der Anstiegswinkel β der idealisierten Geraden des Leistungseinbruchs (Verlustgerade) die Sensitivität des Systems. Hierbei gilt das System als umso sensitiver, je größer der Betrag des Anstiegs ist. Demnach steht die Geschwindigkeit des Leistungsverlustes bei Wirken von Störfaktoren im Mittelpunkt. Durch die angenommenen Geraden für die Sensitivität und Agilität lässt sich das jeweilige Tempo des Einbruchs bzw. der Regeneration der Leistung hervorragend retrospektiv vergleichen.

Die kombinierte Betrachtung der Intensitäts- (absolute Verminderung der Leistungsfähigkeit bis zum verbleibenden Robustheitsniveau) und der Zeitdimension (Veränderung der Leistungsfähigkeit über die Zeit, insbesondere Steilheit der Leistungsminderung und der Erholung) der Resilienz, bedingt ihre Definition als zielgrößenbezogene Leistungsfähigkeit eines Systems über die Zeit, d. h. als Integral der systemischen Durchsatzfunktion über die Dauer der Störungseinwirkung bzw. Beeinträchtigung.

$$\text{Resilienz} = \int_{t_A}^{t_E} L(t) dt$$

Diese zentrale Kennzahl ermöglicht die Beurteilung, wie resilient eine Produktionsstruktur ist. Hierbei gilt: je kleiner die Fläche der Gesamtleistungseinbußen (Vulnerabilität, vgl. [SHEF05]) ist, umso größer wird folglich das Integral der Leistungsfunktion über die Zeit. Bei einheitlichem Betrachtungszeitraum weist die Produktionsstruktur demnach eine ausgeprägtere Resilienz im Vergleich auf, sobald die aggregierten leistungsbezogenen Einbußen geringer ausfallen. Treten keinerlei Leistungsverluste auf, entspricht dies dem maximalen Grad der Ausschöpfung des (geplanten) Potenzials des Produktionssystems.

$$\text{Vulnerabilität} = \text{Potenzial} - \text{Resilienz} = (t_E - t_A) \times L_{\max} - \int_{t_A}^{t_E} L(t) dt$$

Die Vulnerabilität (summarische Leistungseinbußen) der Produktionsstruktur drückt die Auswirkungen störungsbedingter Abweichungen innerhalb des Produktionssystems aus und liefert somit einen Kennwert über die resultierenden Effekte hinsichtlich des Systemverhaltens.

Analog zur Robustheitsbetrachtung ist es darüber hinaus möglich, einen Resilienzgrad als Maß für die anforderungsbezogene Potenzialausschöpfung eines Systems anzugeben:

$$\text{Resilienzgrad} = \frac{\int_{t_A}^{t_E} L(t) dt}{(t_E - t_A) \times L_{\max}}$$

Damit lässt sich die Resilienz vollständig im produktionstechnischen Kontext operationalisieren.

5.3 Kennzahlensystem des Strukturcontrollings

Als Zusammenführung der entwickelten Kennwerte wird nachfolgend das Kennzahlensystem zur Strukturüberprüfung hinsichtlich Eignung und Resilienz als Ordnungssystem eingeführt (Abbildung 5-10). Hierbei sind die Bereiche der Überprüfung der effizienten Funktionserfüllung bzw. der Überwachung des Erhalts der Funktionalität in gesonderten Ästen aufgeführt.

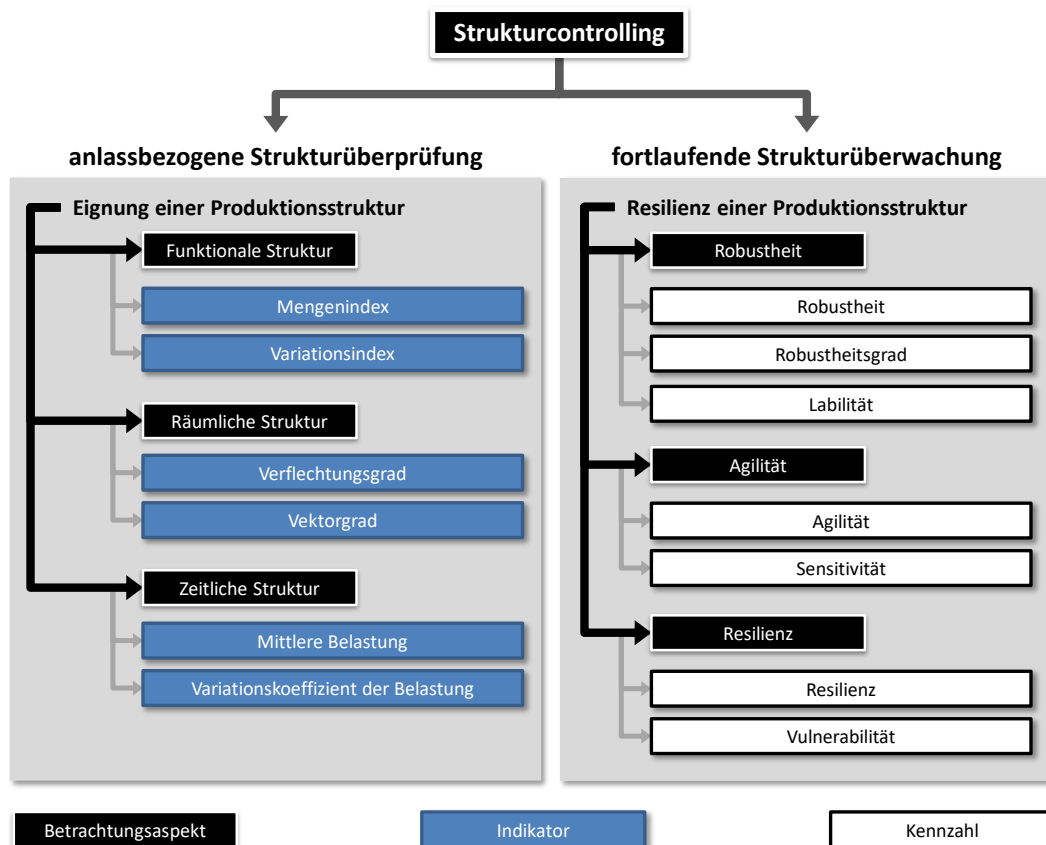


Abbildung 5-10: Kennzahlensystem der Strukturprüfung bzw. -überwachung

Die Maßzahlen der funktionalen, räumlichen und zeitlichen Struktur wirken primär als prospektive Indikatoren. Veränderungen führen anlassbezogen zur Überprüfung und ermöglichen es so, frühzeitig strukturelle Maßnahmen abzuwägen.

Hinsichtlich der Operationalisierung der Resilienz tragen die aufgeführten Bemessungsgrößen zur detaillierten Charakterisierung der variations- oder abweichungsbedingten Kurve des Leistungsverlustes bzw. der Wiederherstellung der Funktionalität bei. Grundlage hierfür bildet die kontinuierliche Verfolgung der Ergebnis- bzw. zielbezogenen Regelgrößen (Fokus: Leistung). Sowohl Agilität als auch Robustheit sowie die divergenten Kennwerte Sensibilität und Labilität beleuchten dabei unterschiedliche Aspekte. Die Resilienz als zentrale Kenngröße fasst diese letztlich rechnerisch zusammen. Auf Grund der fortwährenden Überwachung des Systemverhaltens, besitzen diese Kenngrößen retrospektiven Charakter und fördern das Ergreifen reaktiver Maßnahmen.

Sowohl bei der ereignisorientierten Prüfung der Materialflussmatrix (räumliche Struktur) als auch der Verläufe bzw. der Kontinuität des Auftragsdurchlaufs (zeitliche Struktur) und der kontinuierlichen Überwachung der Ergebnisgrößen spielt der Detaillierungsgrad der Betrachtung eine entscheidende Rolle [WIEN02]. Insbesondere schwankende Belastungssituationen erfordern eine feinere Betrachtung der entsprechenden Mengen- und Zeitinformationen [BORN09]. Die Feinheit der Skalierung der zeit-

lichen Daten beeinflusst die Dauer zum Erkennen steuerungsrelevanter Abweichungen. Die unterschiedlichen benötigten Bearbeitungszeiten, d. h. die Schwankungen der Auftragszusammensetzung, definieren hingegen die erforderliche Granularität der Mengeninformationen hinsichtlich der Messung der Arbeitsvorräte. Die Leistungsbetrachtung verknüpft beide Aspekte und ist somit auf die simultanen Anforderungen abzustimmen [WIEN02]. Je unterschiedlicher die kapazitive Inanspruchnahme durch die einzelnen Produktarten ausfällt und je mehr der Auftragsmix schwankt, desto größer stellt sich die Ungenauigkeit der rein mengenbezogenen Kapazitätsangaben dar [BORN09]. Aus diesem Grund hat für eine variantenreiche Serienfertigung eine arbeitsvorratsbezogene Betrachtung zu erfolgen.

Das vorgestellte Vorgehen zur ereignisorientierten Überprüfung der Eignung von Produktionsstrukturen mit Hinblick auf eine effiziente Funktionserfüllung sowie zur kontinuierlichen Überwachung der Resilienzeigenschaften bezüglich des Funktionserhalts liefert jeweils für sich genommen nötige Impulse, um eine Beurteilung des Adaptionspotenzials zu veranlassen. Bereits die Definition der Indikatoren und Kennzahlen berücksichtigt den erforderlichen Aufwand zur Datenerfassung und -aufbereitung insofern, als dass vordergründig auf zur Verfügung stehende betriebliche Informationen zurückgegriffen wird.

Allerdings fehlt noch das Bindeglied, das die Bewertung der Effizienz einer Produktionsstruktur mit deren Resilienz verknüpft. Bislang werden Kenngrößen verwendet, die jeweils spezifisch den Charakter entweder der strukturellen Dimensionen oder der Fähigkeit zur Selbstregulation repräsentieren. Um eine durchgängige Methodik zur resilienzorientierten Eignungsbeurteilung zu konzipieren, bedarf es in erster Linie eines gemeinsamen Wertmaßstabes, der es ermöglicht, die variationsbedingten Leistungsverluste und die strukturellen Reserven des Leistungsvermögens des betrachteten Produktionssystems gegeneinander abzuwägen.

6 Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen

Vor dem Hintergrund des vorgestellten Vorgehens zur situativen Identifikation des Veränderungsbedarfes sowohl hinsichtlich der Resilienz des Produktionssystems als auch der Eignung seiner Struktur wird in diesem Kapitel das methodische Grundgerüst für eine durchgängige Bewertung von Produktionsstrukturen entwickelt und um einen prospektiven, simulationsgestützten Anteil ergänzt, der es dem betrieblichen Anwender ermöglicht, eine geeignete Systemkonfiguration für ein antizipiertes Produktionsprogramm sowie eine resiliente Strukturausprägung unter Vorwegnahme potenzieller Störszenarien auszuwählen (Abbildung 6-1).

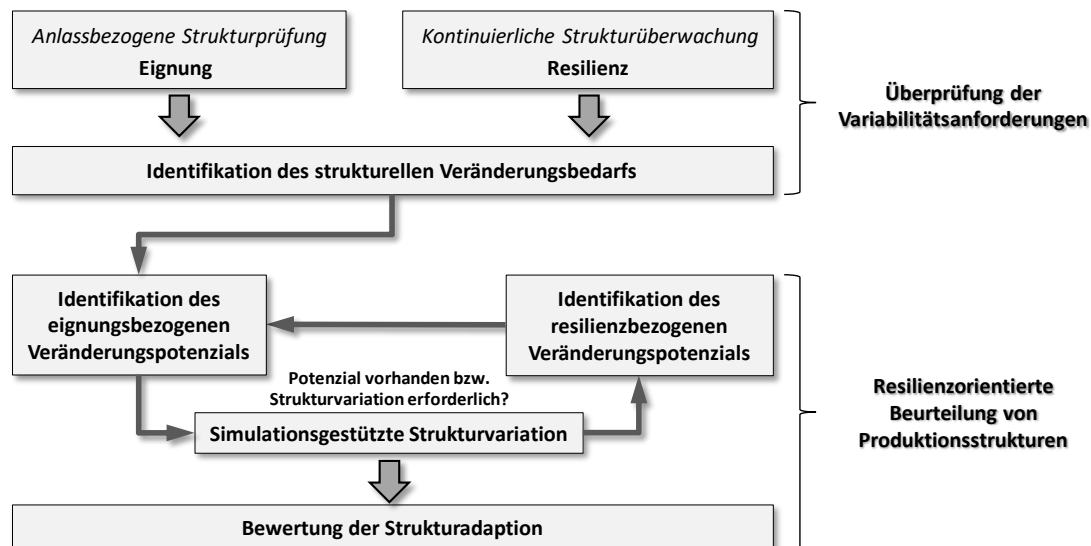


Abbildung 6-1: Vorgehen zur Strukturbeurteilung

Dazu bedarf es zunächst der Ermittlung des Veränderungspotenzials (Abschnitt 6.1), das sich aus geänderten Produktionsaufgaben (eignungsbezogenes Potenzial) oder subsummierten Beeinträchtigungszuständen (resilienzbezogenes Potenzial) ergibt, um daraus aussichtsreiche Strukturadaptation abzuleiten. Daraufhin sind systematisch verschiedene Systemkonstellationen zu simulieren (Abschnitt 6.2), um auf Basis der daraus ermittelten Daten des Systemverhaltens die einzelnen Strukturadaptation zu bewerten und anschließend die beste auszuwählen (Abschnitt 6.3). Die Rekonfiguration betrifft sowohl die Neubildung bzw. Änderung der Struktur als auch die Anpassung der Parameter zur Erzielung einer stabilen Regelung im Sinne der gewünschten Funktionserfüllung.

6.1 Ermittlung des Veränderungspotenzials von Produktionsstrukturen

Sollten bei der Überprüfung der Struktureignung anhand der definierten Indikatoren für die jeweiligen strukturellen Dimensionen ein Veränderungsbedarf auf Grund divergenter Tendenzen der Kenngrößenentwicklung zu erkennen sein oder vorab festgelegte Eingriffsgrenzen über- bzw. unterschritten werden, ist anschließend das Potenzial möglicher Strukturadaptation zu ermitteln. In diesem Abschnitt erfolgt daher die Identifikation des Veränderungspotenzials für die einzelnen Strukturdimensionen durch die Bestimmung idealer Referenzwerte sowie auf Basis der resilienzorientierten Leistungsüberwachung. Auf Grund des jeweiligen Charakters der verschiedenen Untersuchungsaspekte bieten sich grundsätzlich unterschiedliche Überprüfungszyklen an, sofern kein konkreter Anlass die Durchführung der Beurteilung auslöst.

Die Überwachung des Systemverhaltens geschieht fortwährend, so dass der Funktionserhalt (Leistung) im Störfall und damit die Resilienz des Systems automatisch erfasst wird. Die Überprüfung der

Ablaufstruktur, die ebenfalls maßgeblich auf den betrieblichen Zielgrößen beruht, sollte zumindest im taktisch-operativen Bereich kurzfristig erfolgen. Die räumliche Struktur und damit die Anordnung der ortsfesten Arbeitsmittel ist strategisch-taktischer Natur und somit eher mittelfristig zu prüfen. Die Systemzusammensetzung mit der impliziten organisatorischen Arbeitsteilung (funktionale Struktur) besitzt hingegen langfristigen, strategischen Charakter.

In diesem Zusammenhang ermöglichen es die definierten Indikatoren bzw. Kennzahlen, bereits eine (latente) Änderung des Inputs (Produktionsprogramm) in ihrer Wirkung auf die einzelnen Strukturebenen wahrzunehmen und zu erkennen. Gleichzeitig können durch die geschickte Definition der Kenngrößen und der zugehörigen Referenzwerte Tendenzen frühzeitig identifiziert und die veränderten Systemeigenschaften anhand des systemischen Verhaltens ermittelt werden.

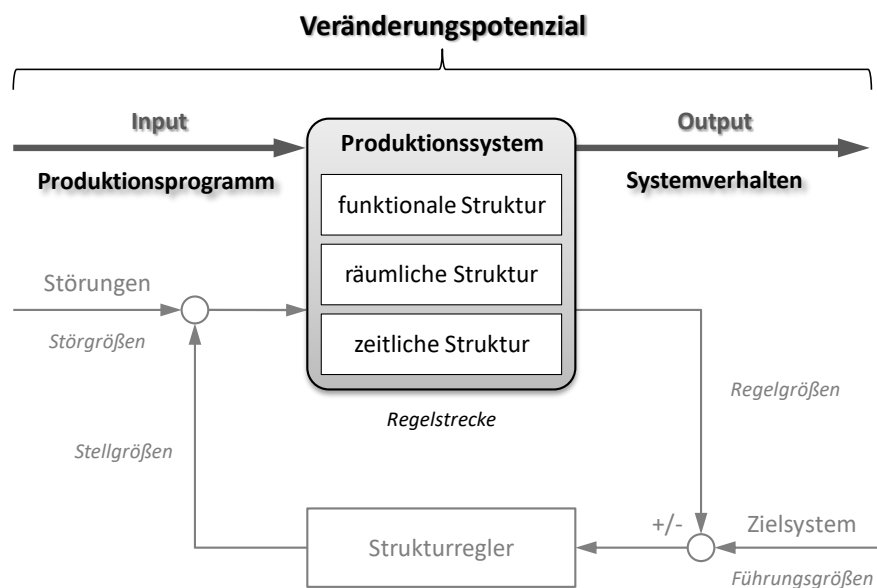


Abbildung 6-2: Ermittlung des Veränderungspotenzials von Produktionsstrukturen

Die Effekte der turbulenzinduzierten Kenngrößenentwicklungen bilden anschließend die Basis für die betriebliche Entscheidung, welche Art der Reaktion angemessen erscheint. Nach der indikatorbasierten Grobanalyse wäre bei Handlungszwang zunächst eine detaillierte Strukturbeurteilung angezeigt (Abbildung 6-2), bevor über die Art der Adaptionmaßnahmen entschieden wird. Insbesondere wenn die Indikatoren einen signifikanten Trend aufweisen, Grenzwerte der Strukturtypen (Verflechtungsgrad) überschritten werden oder die Maßzahlen der einzelnen Strukturdimensionen unterschiedliche Tendenzen zeigen, ist eine Überprüfung des Veränderungspotenzials erforderlich.

Somit ermöglicht das vorgestellte Vorgehen eine schrittweise Prüfung der strukturellen Ebenen hinsichtlich ihrer Eignung bei verändertem Produktionsprogramm (Anhang B). Infolge der detaillierten Beurteilung werden zudem für die zeitliche und räumliche Struktur Referenzwerte generiert, die ggf. die Optimierungsrichtung eine Strukturadaption erkennen lassen. Darüber hinaus werden in Abhängigkeit von den betrieblichen Zielen Ansätze zur Verbesserung der Resilienzeigenschaften des Produktionssystems auf Basis der durchgeführten Verhaltensbeurteilung vorgestellt.

6.1.1 Eignungsorientierte Anpassung der funktionalen Struktur

Eine Definition adäquater Strukturgrenzen im Rahmen der funktionalen Strukturierung bedingt eine möglichst homogene Auftragssituation für das Leistungsspektrum innerhalb eines Subsystems (Vielfaltsindex $\rightarrow 0$) und eine hohe Heterogenität zwischen den einzelnen Organisationseinheiten. In der Regel können hierfür keine Absolutwerte, sondern lediglich relative Kenngrößen in Abhängigkeit der

Charakteristika des Produktionssystems angegeben werden (vgl. Abschnitt 3.2.1). Insofern unterliegt die Bildung von Leistungseinheiten stets betriebsspezifischen Anforderungen. Infolgedessen wird auf die Ermittlung einer idealen funktionalen Struktur verzichtet. Dennoch lassen sich allgemeine Stoßrichtungen auf Basis der indikatorbasierten Prüfung eines geänderten Produktionsprogramms ableiten.

Neben den unmittelbaren Effekten einer geeigneten Strukturierung hinsichtlich der Effizienz des entstehenden Produktionssystems existieren auch eher indirekt effizienzsteigernde Aspekte auf Basis von erfahrungsbildenden Lernprozessen (vgl. Erfahrungskurve [HEND74]) innerhalb der gebildeten Struktureinheiten. Dies setzt im Sinne der Grobstrukturierung primär eine adäquate Fokussierung des betreffenden Subsystems (Leistungs-/Organisationseinheit) voraus. Zu diesem Zweck ist eine geeignete und damit ziel- und anforderungsorientierte organisatorische Grundausrichtung (funktionale Struktur) zu etablieren. Durch die Strukturierung wird die Spezialisierung abgegrenzter Leistungseinheiten ermöglicht. Im Zuge dessen erfolgt zumeist eine Standardisierung von Routinetätigkeiten innerhalb der jeweiligen Produktionssysteme (vgl. Organisationsgrad). Exklusive Erfahrungen und Lerneffekte in den einzelnen organisatorischen Einheiten fördern die Effizienz der Auftragsabarbeitung.

Die Spezialisierung der Leistungseinheiten nutzt dabei zum einen Synergien in der Fertigung und Montage der Produkte durch vorhandene Ablaufähnlichkeiten (Ablauffamilien) und zum anderen resultiert daraus gleichzeitig eine eindeutige Ausrichtung der Leistungseinheiten gemäß dem betrieblichen Zielsystem. Abhängig davon, ob eher ein Mengen- oder ein Vielfaltsfokus vorherrscht, bestehen disparate Zielstellungen. Durch eine entsprechende Strukturierung wird eine Homogenisierung des zu bewältigenden Produktspektrums und des jeweiligen Mengengerüsts beabsichtigt. Die personellen sowie technischen Ressourcen sind dabei ebenso wie die zu fertigenden Produkte eindeutig den einzelnen Organisations- bzw. Leistungseinheiten zugeordnet. Die Stimmigkeit der vorgenommenen Aufgabenspezialisierungen und der wechselnden Auftragsituation führt zur Bildung geeigneter Subsysteme. Auf Grund der Dynamik der aus dem Produktionsprogramm resultierenden Produktionsaufgabe sind die konkreten Ausprägungen der Strukturspezialisierung der einzelnen Leistungseinheiten innerhalb des Produktionssystems permanent Änderungen unterworfen.

Die Veränderungen des Produktionsprogramms im Zeitverlauf, welche anhand der kombinierten Betrachtung von Mengen- und Vielfaltsindex charakterisiert werden, bestimmen maßgeblich die funktionale Strukturierung und damit die Bildung von Leistungseinheiten:

- Für eine vorhandene Leistungseinheit kann eine Belastungszunahme (Mengenindex \nearrow) sowie ein veränderter Produktmix (zunehmende Schwankungsbreite) in eine Spezialisierung der Struktureinheit mit Mengen- bzw. Vielfaltsfokus münden. Das bestehende System erfährt in diesem Fall eine Aufteilung in ein Renner- (Mengenfokus) und ein Exoten-Subsystem (Vielfaltsfokus), soweit dies auf Basis der gegebenen Ressourcen (Systemzusammensetzung) möglich ist. Konzentrieren sich die Stückzahlen auf einen homogenen Bereich ist eine ausschließliche Mengenspezialisierung zweckmäßig.
- Herrscht bereits eine Mengenspezialisierung vor und die Auftragsmengen streuen tendenziell in zunehmendem Maße auf Grund einer steigenden Variantenanzahl (Vielfaltsindex \nearrow), handelt es sich folglich um eine vielfaltsorientierte Struktureinheit. Liegt hingegen eine Vielfaltspezialisierung vor und die Auslastung nimmt durch hohe Auftragsstückzahlen zu (Mengenindex \nearrow), so empfiehlt sich wiederum eine Segmentierung in eine Mengen- und eine Vielfaltsstruktur.

Außer für den Fall eines sich zunehmend homogenisierenden Produktionsprogramms (Vielfaltsindex \searrow) kommt es daher tendenziell zu einer immer weitergehenden Spezialisierung und damit Segmentie-

rung der Produktionseinheiten, sofern die Ressourcenbasis dies zulässt. Sollte die Systemzusammensetzung nicht ausreichen, bedarf es einer neuen planerischen Funktionsbestimmung und/oder Dimensionierung der technischen bzw. personellen Potenzialfaktoren (Abbildung 6-3).

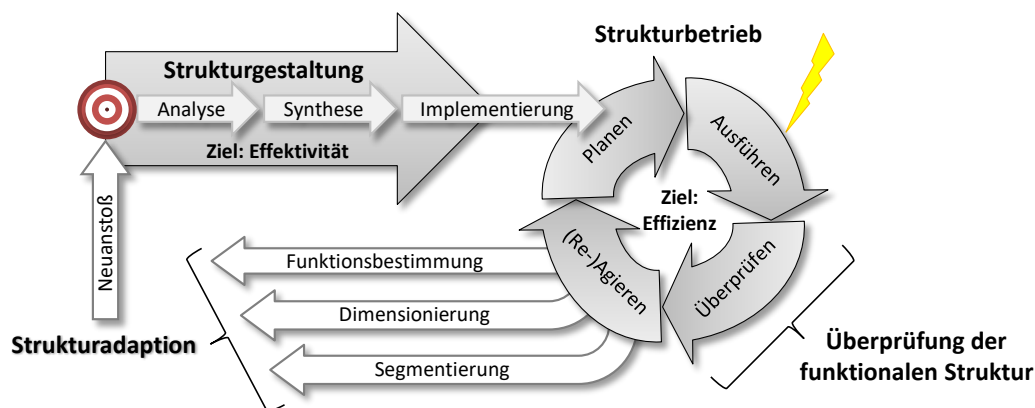


Abbildung 6-3: Strukturadaption infolge der Prüfung der funktionalen Struktur

Allgemein tendiert ein Produktionssystem mit geringem Vielfalts- und hohem Mengenindex zu einer gegenstandsorientierten Struktur. Bei entgegengesetzten Vorzeichen ist eine Artaufstellung nach dem Verrichtungsprinzip wahrscheinlicher.

6.1.2 Eignungsorientierte Anpassung der räumlichen Struktur

Die Untersuchung der räumlichen Struktur zur Identifikation des strukturellen Potenzials und möglicher Strukturadaptionen hat die aus der konkreten Topologie der ortsgebundenen Ressourcenelemente erwachsene **Transportleistung** als Grundlage. Diese Kennzahl, die stellvertretend für den durch diese Strukturdimension verursachten Aufwände der Leistungserstellung steht, hängt jedoch von der konkreten Gestaltungslösung unter Berücksichtigung aller vorhandenen Restriktionen ab. Daher ist zunächst eine Topologieebene zu definieren, die einen raschen Vergleich unterschiedlicher Strukturkonzepte erlaubt, um so den Ist-Zustand gegenüber einer möglichen Ideal-Anordnung zu bewerten. Hierfür bietet sich das Groblayout an (vgl. [KETT84], [AGGT90]), da es bereits Flächendimensionen beinhaltet, ohne dabei die konkrete Flächengestalt zu erfordern. Die Transportentfernungen können zur Vereinfachung auf die jeweiligen Flächenschwerpunkte der Arbeitssysteme bezogen werden. Insofern sind Zu- und Abgangsorte des Materialflusses zu vernachlässigen, was den Berechnungsaufwand merklich reduziert.

Demzufolge ist zum einen die bestehende Ressourcenanordnung in ein **flächenmaßstäbliches Blocklayout**, d. h. Groblayout, zurück zu überführen. Fabrikplanerisch genügt diese Granularitätsstufe den Genauigkeitsanforderungen und der Detaillierung der potenziell vorhandenen Datenbasis gleichermaßen. Auf Grundlage dieses Aufstellungsplans kann eine schwerpunktzentrierte Entfernungsmatrix abgeleitet werden, mit deren Hilfe unter Berücksichtigung der aus dem anstehenden Produktionsprogramm erwachsenen Materialflussintensitäten die Ermittlung der summarischen Transportleistung erfolgt.

Zum anderen ist aus dem geforderten Leistungsprogramm die optimale räumliche Anordnung der ortsgebundenen Ressourcenelemente zu ermitteln. Hierbei reicht es zum Zwecke der Vergleichbarkeit aus, ebenfalls ein flächenmaßstäbliches Blocklayout (Groblayout) zu erstellen, von dem wiederum die schwerpunktorientierten Entfernungen gefolgert werden. Das hat den Vorteil, dass das Ideallayout nicht vollständig mit Senken und Quellen für jedes einzelne Arbeitssystem ausgearbeitet werden muss,

wodurch der Aufwand begrenzt bleibt. Hierfür bieten sich gängige Methoden der Maschinenanordnung und deren Verbesserung an (vertiefend [SCHE14], [GRUN12], [KETT84], [AGGT90]).

Zwischen geplanten (idealen) Groblayout und umgesetzten detaillierten Reallayout bestehen in der Regel gewisse Diskrepanzen, die den gebäudebedingten Restriktionen geschuldet sind. Diese sind bei der Beurteilung der Transportleistung prinzipiell zu berücksichtigen, da sie zu einer Abweichung des berechneten (idealisierten) vom tatsächlichen Wert führen. Dennoch stellt das Groblayout durch seinen Flächenbezug einen geeigneten Vergleichsmaßstab für die bestehende und die durch das aktuelle Produktionsprogramm bedingte ideale Topologie dar. Anhand der berechneten Differenz der Transportleistungen, d. h. der durch die jeweilige räumliche Struktur bedingten mittleren Aufwände für den Teiledurchlauf, ist das Potenzial dieser Strukturdimension ersichtlich, so dass auf die Notwendigkeit bzw. Zweckmäßigkeit zum Anpassen der Aufbaustruktur geschlossen werden kann (Abbildung 6-4). Zudem visualisieren die jeweiligen Topologien der arbeitssystemspezifischen Flächen bereits etwaige Unterschiede der beiden Anordnungskonzepte.

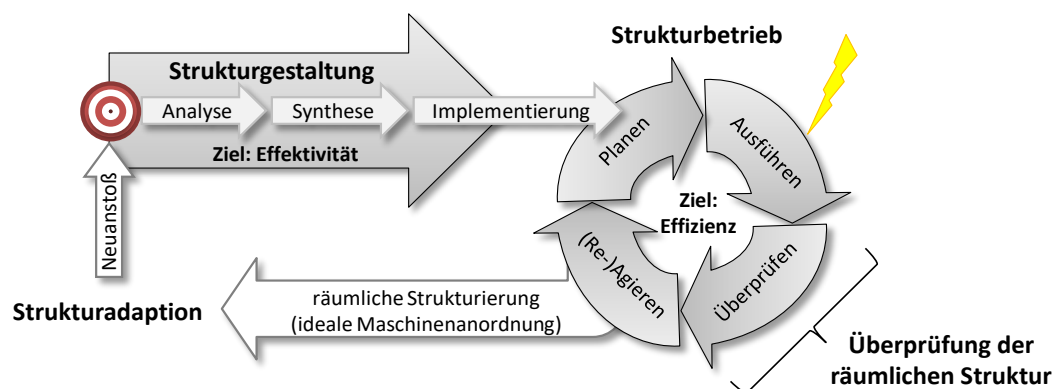


Abbildung 6-4: Strukturadaption infolge der Prüfung der räumlichen Struktur

Hinsichtlich der strukturellen Übergänge hat der Aspekt der Verkettung dahingehend Bedeutung, dass mit zunehmender Kontinuität des Teiledurchlaufs und Proportionalität der Arbeitssystembelastungen eine starre Kopplung an Attraktivität gewinnt, weil dadurch Effizienzsteigerungen möglich sind. Insofern spricht eine derartige Entwicklung des Produktionsprogramms eher für verkettete Arbeitsplätze in linienförmiger Anordnung. Im entgegengesetzten Fall tendiert die Topologie zu einem Netz mit Entkopplung. In diesem Zusammenhang werden ggf. zweckmäßige Flächenüberlagerungen (vgl. [WIRT89], [HELB10]) und deren Auswirkungen auf das Reallayout im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt (**Abgrenzung:** keine Flächenüberlagerung).

Bei der Ermittlung der Intensitäten besitzen auf Grund des Heranziehens der Transportleistung ausschließlich die Mengenverhältnisse der einzelnen Produktarten Relevanz. Sofern sich hierbei keine Änderungen ergeben, es folglich zu einer proportionalen Zu- oder Abnahme des Produktionsvolumens kommt, ändert sich die räumliche Struktur nicht.

Die detaillierte Bewertung ermittelt somit nicht nur den aktuellen Zustandswert der Transportleistung. Vielmehr gibt die erzeugte Ideal-Anordnung einen Hinweis über die anzustrebende räumliche Strukturadaption. In diesem Zuge erfolgt die Generierung eines Vergleichsmaßstabs im Sinne einer Optimierungsrichtung, der die Güte der vorliegenden Strukturlösung im Vergleich zur idealen Konfiguration ausdrückt. An die Beurteilung der Aufbaustruktur schließt sich unabhängig von einem identifizierten Handlungsbedarf stets die Eignungsprüfung der durch sie bedingten zeitlichen Strukturebene an.

6.1.3 Eignungsorientierte Anpassung der zeitlichen Struktur

Zur Ableitung grundsätzlicher Strategien hinsichtlich der Anpassung der zeitlichen Struktur bedarf es einer detaillierten Prüfung des Systemverhaltens. Um das Potenzial der Ablaufstruktur offenzulegen, wird analog zur Ermittlung der Eignung der räumlichen Struktur die Passfähigkeit der bestehenden Ablaufstruktur auf Basis des anstehenden Produktionsprogramms mit einem Referenzwert verglichen und normiert. Die Normierungsgröße stellt das Betriebsoptimum unter Berücksichtigung der funktionalen Struktur der Organisationseinheit dar. Der ideale Betriebspunkt ist durch die maximale praktische Leistung (Durchsatz), die minimale Durchlaufzeit und den zur Vollauslastung notwendigen Mindestbestand definiert [NYHU12]. All diese Kenngrößen können statisch über die Charakteristik des vorliegenden Produktionssystems insbesondere auf Basis der Systemzusammensetzung, der vorliegenden Arbeitsplandaten und der zu bewältigenden Leistungsanforderungen (Produktionsprogramm) ermittelt werden. Sie dienen als maßgebliche Werte zur Identifikation des zeitlichen Strukturpotenzials.

Die **minimale Durchlaufzeit** lässt sich als Summe der Transportzeiten und der losgrößenabhängigen Belegungszeiten (ZAU_p) aller Produkte (p) jeweils über alle zu durchlaufende Arbeitssysteme (i) auftragsorientiert ermitteln (vgl. [NYHU12]). Mit Hilfe des Produktionsprogramms und der daraus abgeleiteten Mengenrelation der einzelnen Erzeugnisarten (m_p) kann ein stückzahlgewichtetes arithmetisches Mittel errechnet werden, das nachfolgend als Referenzwert dient:

$$DLZ_{\min,p} = \sum ZAU_{p,i}$$

$$DLZ_{\min} = \frac{m_p \cdot DLZ_{\min,p}}{\sum m_p}$$

Zwar entspricht diese Kenngröße ausschließlich einem theoretisch zu erreichenden Minimalwert, allerdings besitzt sie eine strukturabhängige Charakteristik. Das untermauert die Anwendungsrelevanz als Orientierungswert. Durch Normierung von sich einstellender Durchlaufzeit (DLZ_{BP}) zu ihrem theoretischen Minimum ergibt sich der Flussgrad (vgl. Abschnitt 3.2.2) als Vergleichswert:

$$\text{Flussgrad} = \frac{DLZ_{BP}}{DLZ_{\min}}$$

Er erlaubt eine Aussage über die entstehenden Opportunitätskosten dahingehend, dass während der zusätzlichen Dauer ein Vielfaches an Produkten hergestellt werden könnte.

Die praktisch **maximale Leistung** des Produktionssystems hängt wiederum von der sich aus dem Produktionsprogramm ergebenden mittleren Belastung ab. Die theoretische Obergrenze definiert die gesamtsystemische Kapazität. Das geplante Produktionsprogramm hingegen nimmt nur einen Teil der kapazitiven Ressourcen in Anspruch, sofern die Systemzusammensetzung suffizient ist, weshalb sich die tatsächliche Leistung des Systems stets unterhalb der Kapazitätsgrenze befindet. Das liegt u. a. daran, dass Ressourcen nur ganzzahlig zur Verfügung gestellt werden können und auf Grund des komplexen Wirkgefüges der unterschiedlichen Aufträge stochastische Leerzeiten an den Arbeitsmitteln entstehen. Aus der Belastung, die aus dem Produktionsprogramm herrührt, lässt sich statisch die zu erwartende Inanspruchnahme der einzelnen Kapazitäten berechnen und zur maximalen Leistung aggregieren.

$$L_{\max} = \frac{\sum_i \sum_p ZAU_{p,i}}{T}$$

mit: i – Index der Arbeitsmittelart
 p – Anzahl der Produkte, die auf bestimmten Arbeitsmitteln gefertigt werden
 T – Betrachtungszeitraum in BKT

Es bleibt anzumerken, dass die installierte Kapazität mitunter deutlich größer ausfällt, als die produktionsprogrammbedingte Inanspruchnahme. Auch wenn dieser Referenzwert die Dynamik des Nachfrageverlaufs vernachlässigt, eignet er sich hervorragend als strukturabhängige Normierungsgröße, da er die Beanspruchung des Strukturpotenzials ausdrückt. Zudem trägt er der Produktivität im Leistungserstellungsprozess Rechnung (vgl. [GLÖC16]) und bildet die Auslastung auf Basis der durch die Produktionsaufgaben entstehenden Belastungssituation:

$$\text{Auslastungsgrad} = \frac{L_{BP}}{L_{max}}$$

Als Normierungswert kommt grundsätzlich auch das Kapazitätsangebot in Frage. Jedoch reflektiert dieses nicht die durch das Produktionsprogramm erzeugte Belastung des Produktionssystems.

Ebenso wie die Leistung wird der **Mindestbestand** ressourcenorientiert ermittelt. Der von Schneider [SCHN04] vorgestellte Ideale Mindestbestand ist als Maßzahl ungeeignet, weil er eine stabile Engpass-Situation voraussetzt, was wiederum eine unrealistische Annahme für komplexe Produktionssysteme im turbulenten Umfeld darstellt. Deshalb wird eine pragmatische Definition verwendet, die sich zum einen an einer typischen betrieblichen Datenbasis orientiert und zum anderen die Errechnung ohne vorherige Simulation vereinfacht. Im Sinne des Systemansatzes lässt sich der zeitliche Arbeitsvorrat aller Produkte innerhalb eines Produktionssystems als zeitlich bewerteter Gesamtbestand auffassen. Dabei drücken die summarischen Ausführungszeiten der einzelnen Erzeugnisse ihren jeweiligen Arbeitsvorrat aus, mit dem sie das Produktionssystem insgesamt und damit jedes einzelne Arbeitssystem sukzessive belasten.

Die Ermittlung des zur Vollauslastung aller Betriebsmittel notwendigen Bestandes als Referenzwert erfolgt daher in mehreren Berechnungsschritten. Zunächst erfolgt die Berechnung der mittleren Ausführungszeit (ZAU_m) als stückzahlgewichtete Gesamt-Belegungszeit einer Betriebsmittelart i (vgl. [NYHU12]):

$$ZAU_{m,i} = \frac{\sum m_p \cdot ZAU_{p,i}}{\sum m_p}$$

Das Heranziehen der aggregierten Belegungszeiten ist erforderlich, da hier der Mindestbestand für das gesamte Produktionssystem und nicht für ein einzelnes Betriebsmittel bzw. eine einzelne Arbeitsstation betrachtet wird. Für jeden Arbeitsmitteltyp lassen sich anschließend die jeweiligen Variationskoeffizienten (ZAU_v) ableiten (vgl. [NYHU12]):

$$ZAU_{v,i} = \frac{\sigma(ZAU_{p,i})}{ZAU_{p,i}}$$

Unter Berücksichtigung der Systemzusammensetzung (Art i und Anzahl n der Arbeitsmittel) können die ressourcenorientierten Werte zum gesamtsystemischen Mindestbestand summiert werden:

$$B_{min} = \sum_i \left(n_i \cdot ZAU_{m,i} \cdot (1 + ZAU_{v,i})^2 \right)$$

Dieser dient im Fortgang als Orientierungsgröße für Anpassungen der zeitlichen Struktur. Hierbei besteht durchaus die Möglichkeit, dass der gemessene Arbeitsvorrat kleiner als der berechnete Referenzwert ist. Dies spricht tendenziell für ein schwach ausgelastetes Produktionssystem, bei dem die Kapazitätsinanspruchnahme infolge des zu bewältigenden Produktionsprogramms verhältnismäßig gering ausfällt. Allerdings betrifft das bestandsbezogene Potenzial vor allem Zustände, bei denen die Verhältnisskennzahl über 100 % beträgt und somit eine Vorratsbildung über das nötige Maß hinaus auftritt:

$$\text{Bestandsgrad} = \frac{B_{BP}}{B_{\min}}$$

Die Rückmeldedaten der vergangenen Betrachtungs- bzw. Planungsperiode stellen die Basis für die systemcharakterisierenden Verhaltensparameter dar. Anhand der produktionslogistischen Kenngrößen wird daraufhin jeweils das momentane Ergebnis der Produktion mit dem gewünschten bzw. idealen verglichen, wodurch wiederum infolge des Aufzeigens des strukturellen Potenzials der Zwang zum Handeln und der sich einstellende Nutzen hinsichtlich der produktionslogistischen Zielgrößen für die betrieblichen Akteure bewertbar ist.

Bei der detaillierten Beurteilung wird das Systemverhalten als Ergebnisgröße anhand des sich einstellenden Betriebspunktes (BP) bewertet. Dabei geht die eingehende Analyse des momentanen Arbeitspunktes des Produktionssystems tiefer als die fortwährende Überwachung der produktionslogistischen Zielgrößen, da sie zwar die gleichen Kennzahlen heranzieht, diese aber jeweils ins Verhältnis zu einem definierten Referenzwert setzt. Insofern wird das Potenzial der bestehenden Struktur in Bezug auf beste Ausprägung deutlich.

Die Beurteilung der Güte des Betriebspunktes erfolgt anhand folgender Überlegungen. Unter Beachtung der allgemeinen betrieblichen Zielrichtung sind sowohl Bestand (B) als auch Durchlaufzeit (DLZ) möglichst zu minimieren, wohingegen die Leistung (L) zu maximieren ist. Bei Bildung eines passenden Kennwerts (Z_{BP}) kann das gemeinsame Optimum ($Z_{BP} \rightarrow 0$) aus allen drei maßgeblichen betrieblichen Zielen ermittelt werden.

$$Z_{BP} = \frac{g_B \cdot B \cdot g_{DLZ} \cdot DLZ}{g_L \cdot L}$$

Der Quotient Z_{BP} signalisiert unter Berücksichtigung der jeweiligen Gewichtung (g_B , g_{DLZ} bzw. g_L) die relative Zielerreichung des Betriebspunktes. Sofern er bei anderweitigen Konfigurationen ein vergleichsweises Minimum erreicht, drückt jenes das beste Verhältnis aller drei Zielgrößen aus. Je größer der Kennwert ist, desto suboptimaler verhält sich das Produktionssystem. Infolgedessen lässt sich darauf schließen, dass die Produktionsstruktur einer Verbesserung bedarf.

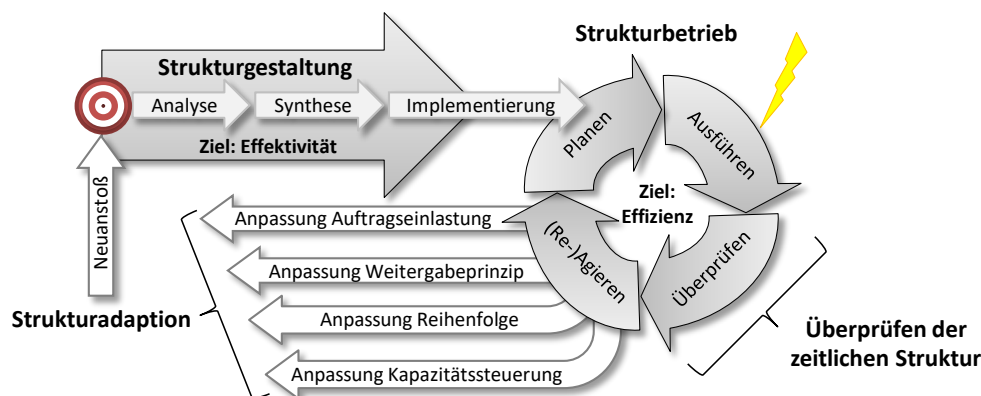


Abbildung 6-5: Strukturadaption infolge der Prüfung der zeitlichen Struktur

Die Maßzahlen der zeitlichen Struktur sind eher als retrospektiv anzusehen, da sie Ergebniswerte eines bestimmten Betrachtungszeitraums darstellen. Dennoch implizieren die Kennzahlen bei entsprechender Ausprägung zumeist gewisse Strukturadaptionen (Abbildung 6-5). Dies betrifft zum einen die Änderung des Steuerungsverfahrens im taktischen Bereich, was der simultanen Anpassung mehrerer Stellgrößen gleichkommt, oder die kurzfristige konkrete Parametereinstellung im Rahmen der operativen Produktionsregelung.

6.1.4 Resilienzorientierte Anpassung der Produktionsstruktur

Da das Auftreten von betrieblichen Störungen per definitionem eine ungewollte Situation darstellt, ermöglicht bereits die in Abschnitt 5.2 vorgestellte Quantifizierung der Resilienz eine zieladäquate und zuverlässige Beurteilung des aktuellen Betriebsmodus gegenüber dem angestrebten Soll-Zustand der Funktionserfüllung.

Treten störungsbedingt Abweichungen vom ursprünglichen Produktionsplan auf, ist dies mit strukturabhängigen Leistungsverlusten verbunden. Geeignete Maßnahmen sollen dafür sorgen, das initiale Leistungsniveau schnellstmöglich wieder zu erreichen (Abbildung 6-6). Die Handlungsalternativen besitzen unterschiedliche Wirkung insbesondere bezüglich der Geschwindigkeit der Erholung, d. h. Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit, und des dazu erforderlichen Aufwandes. Auf Basis des Ausmaßes der Leistungseinbußen ist es möglich, die Resilienz der Produktionsstruktur in Hinblick auf die aufgetretene Störsituation zu ermitteln und passende Handlungsoptionen auszuwählen.

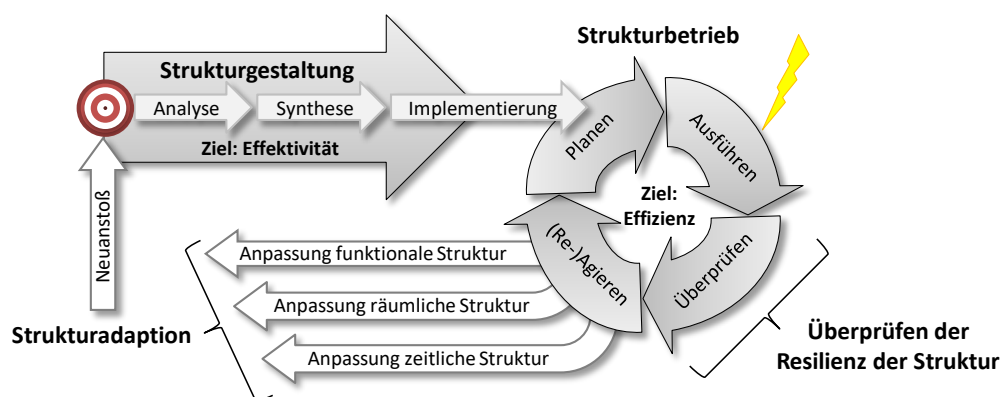


Abbildung 6-6: Strukturadaption infolge der Prüfung der Resilienz

Wirken Störungen auf ein Produktionssystem ein, ohne dass sich die systemrelevanten Anforderungen ändern, ist die effiziente und effektive Funktionserfüllung mitunter eingeschränkt bzw. beeinträchtigt. Gemäß der Resilienz-Sichtweise (Abschnitt 2.4.2) kann in einer stabilen Umwelt auch bei eintretenden Störereignisse der Gleichgewichtszustand der Funktionserfüllung entweder beibehalten (Robustheit) oder mittels geeigneter Anpassungsmaßnahmen schnellstmöglich wiedererlangt werden (Agilität), so dass das System letztlich zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit zurückkehrt. Die vorhandene Robustheit des Systems soll dafür sorgen, dass die Funktionserfüllung trotz ausgesetzten Störfaktoren vollständig gewährleistet ist. Eine Erweiterung dieser Auffassung bietet Anhang C.

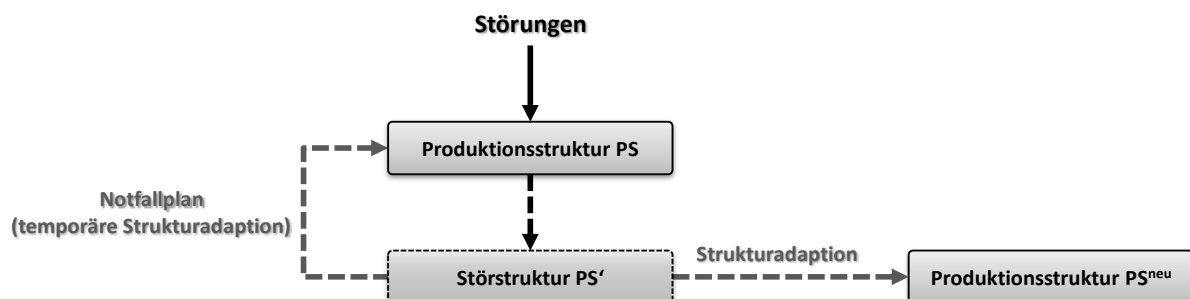


Abbildung 6-7: Entstehen von temporären Störstrukturen

Reicht diese systemimmanente Widerstandsfähigkeit bei bestimmten Störungen nicht aus, ergibt sich ein struktureller Anpassungsbedarf (Abbildung 6-7). Beim Auftreten und Wirken von Störfaktoren im betrieblichen Alltag wird im Rahmen einer ersten Reaktion mittels gezielter Eingriffe zunächst darauf abgezielt, die Effekte zu begrenzen (temporäre Strukturadaptation). Dabei sind die Strukturelemente (Ressourcen und/oder Beziehungen) in ihrer effektiven und effizienten Funktionsfähigkeit eingeschränkt (z. B. reduzierte Verfügbarkeit, verminderte Leistungsfähigkeit usw.), so dass eine veränderte Gesamtstruktur in einer Störsituation vorliegt (Störstruktur), die zwangsläufig dazu tendiert, ein Suboptimum darzustellen. Daraus resultieren die (temporäre) Adaption der Störstruktur (Notfallplan im Zuge der ersten Reaktion) und das anschließende Beseitigen der Störungsursachen, um zur Ursprungsstruktur zurückzukehren.

Lassen sich die Auslöser der Beeinträchtigung bzw. ihre Auswirkungen nicht beseitigen, erfolgt eine anderweitige Strukturadaptation auf Basis der Agilität des Systems, die dazu führt, dass letztlich eine neuartige Strukturausprägung vorliegt. Dies gilt vor allem für nachfragebedingte Variationen des Produktionsprogramms. Im Falle geänderter Eingangs- und Umweltbedingungen und somit einer veränderten Produktionsaufgabe ist eine Rückkehr zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit mitunter gar nicht möglich oder gewünscht, so dass stattdessen ein neuer Betriebsmodus angestrebt wird.

Stellt sich eine Produktionsstruktur allerdings trotz turbulenzbedingter Änderungen des Produktionsprogramms und wirkenden Störfaktoren weiterhin als effizientestes und damit wirtschaftlichstes Strukturkonzept hinsichtlich ihrer Funktionserfüllung heraus, ist diese als robust anzusehen. Demzufolge ist sie nach wie vor als geeignet zu bezeichnen. Andernfalls handelt es sich um eine Übergangsstruktur, die einer ziel- und aufgabenadäquaten Anpassung bedarf, bei der wiederum die systemimmanente Agilität offensichtlich wird.

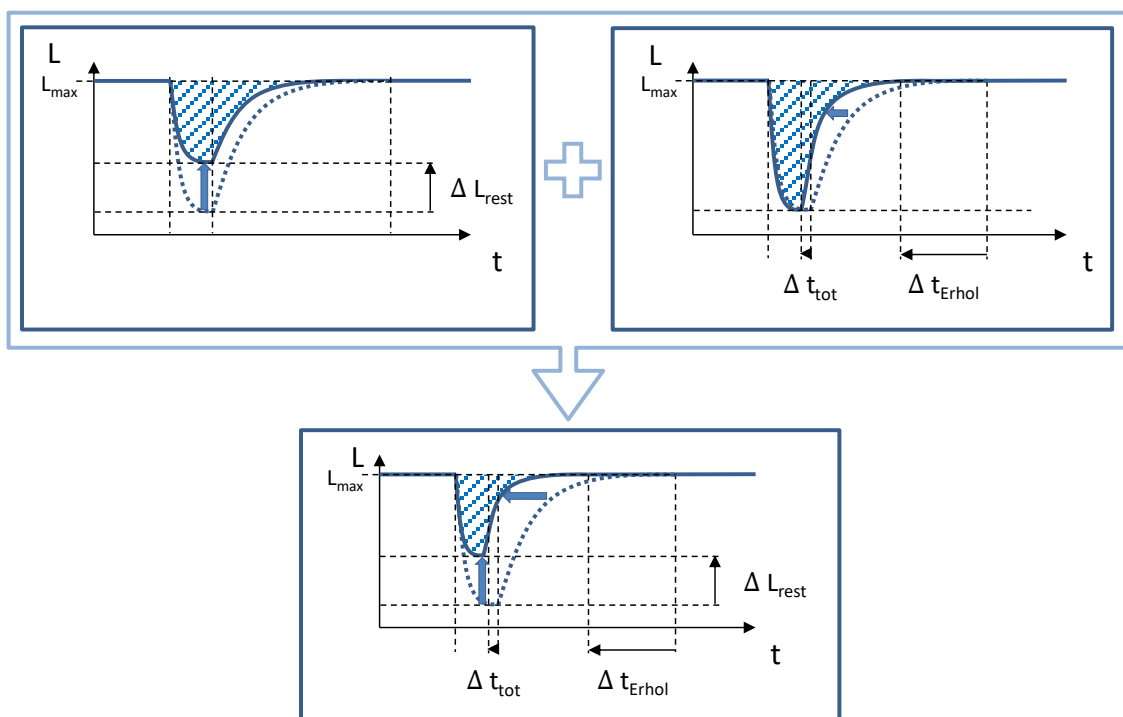


Abbildung 6-8: Strategien zur Resilienzsteigerung

Mit Blick auf die beiden wesentlichen Aspekte der Resilienz, Robustheit und Agilität, bestehen verschiedene Strategien zur Verbesserung der Ursprungssituation (Abbildung 6-8).

Da Robustheit eine prospektiv installierte Systemeigenschaft darstellt, ist eine entsprechende Anpassung nur vorab möglich. Dabei ermöglicht der Einsatz von Simulationsmodellen die vorherige Beurteilung von Strategien zur Abschwächung der Effekte potenzieller Störszenarien (vgl. Abschnitt 6.2). Vor diesem Hintergrund kann eine prognostische Betrachtung sowohl der Auftretenswahrscheinlichkeit als auch der Auswirkungen der Störungen vorgenommen werden.

Insofern umfassen Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit vordergründig Strategien zur Abschwächung des Ausmaßes von Leistungsverlusten. Durch Prognose zukünftiger Veränderungen (Antizipation) kann eine Resistenz gegenüber vorhergesagten Variationen dahingehend aufgebaut werden, dass das Produktionssystem seine Abhängigkeit von den betreffenden Einflussgrößen verringert. Vor diesem Hintergrund kommen bspw. Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der technischen Ressourcen zum Tragen.

Dagegen beruht Agilität zum einem auf einem Bündel reaktiver Handlungsweisen, welches wiederum simulationsgestützt vorab auf seine Wirksamkeit hinsichtlich der Beseitigung bestimmter Störungseffekten bewertet werden kann. Somit lässt sich die Geschwindigkeit durch umgehende und gezielte Gegenmaßnahmen auf wahrgenommene Änderungen erhöhen. Diesbezüglich ermöglicht die Universalität von Arbeitsmitteln maßgeblich eine flexible Reaktion auf veränderte Einflussgrößen.

Zum anderen ist eine kennzahlenbasierte Kontrolle und Überwachung sowohl des Unternehmensumfeldes als auch des Produktionssystems an sich mit seinen Ressourcenelementen erforderlich, um frühzeitig relevante Veränderungs- und Störimpulse wahrnehmen zu können (vgl. Kapitel 5).

6.2 Simulationsgestützte Entwicklung alternativer Strukturkonzepte

Neben der Beurteilung der Eignung der Produktionsstruktur für die Bewältigung eines Produktionsprogramms (Leistungsanforderungen) sind die betrieblichen Akteure in der Findung und Bewertung geeigneter Adaptionmaßnahmen zu unterstützen. Zur Vorwegnahme des dynamischen Systemverhaltens eines veränderten Produktionssystems bedarf es einer Simulationsstudie, die die Auswirkung von Parameter- und Konfigurationsänderungen anhand empirischer Ergebnisgrößen abschätzbar macht (vgl. [VDI3633], [ELSW13]).

Für eine prospektive Strukturbewertung (Abbildung 6-9) ist die Durchführung einer Simulation unerlässlich [KUPR91], da nur so der Dynamik der Leistungserstellung Rechnung getragen wird. Hierbei ermöglicht der modulare Aufbau von experimentierbaren Simulationsmodellen unter Nutzung der Datenbestände aus der Digitalen Fabrik mittlerweile eine aufwandsarme Generierung unterschiedlichster Versuchsumgebungen [KAPP11], [KÜHN06].

Um eine zielgerichtete Versuchsdurchführung zu gewährleisten, ist die sukzessive Variation eines Simulationsmodells auf Basis seiner bestehenden Konfiguration erforderlich. Dabei gilt es, die identifizierten strukturellen Stellgrößen (Abschnitt 3.1) derart zu verändern, dass sie der Produktionsstruktur zu einer Annäherung an den idealen Systemzustand im Sinne der definierten Zielstellungen unter Berücksichtigung der daraus abgeleiteten Optimierungsrichtung verhelfen (Abschnitt 6.1). Allerdings steht die Entscheidung, welche Strukturvariationen simuliert werden, nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit, da diese klassisches Handwerkszeugs des Betriebsgestalters bzw. Fabrikplaners darstellt. Die Ergodizität der Simulation wird zudem vorausgesetzt.

Die erforderlichen Informationen zur Erstellung der Simulationsmodelle umfassen Bestands- und Bewegungsdaten sowie die kostenseitigen Werte (vgl. [VDI3633]).

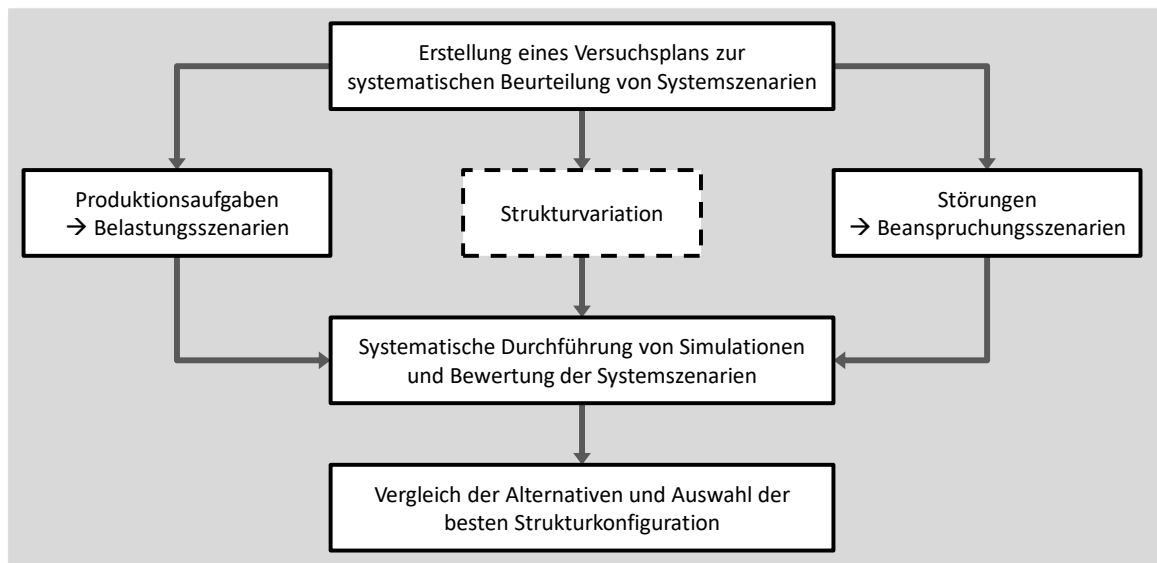


Abbildung 6-9: Vorgehen zur resilienzorientierten Potenzialbeurteilung

6.2.1 Erstellung von Systemszenarien

Das Ziel der simulationsgestützten Versuche ist die Bestimmung charakteristischer Betriebspunkte (Messpunkte der Zielgrößen) für unterschiedliche Belastungssituationen und Störszenarien bei wechselnder struktureller Konfiguration des Produktionssystems, um so alternative Strukturkonzepte zu entwickeln, die einer anschließenden Bewertung hinsichtlich ihrer Vorteilhaftigkeit gegenüber dem Ist-Zustand unterzogen werden können. Ein Systemszenario (Abbildung 6-10) bezeichnet in diesem Zusammenhang die konkrete Konstellation von Störgrößen, Input (zu bewältigendes Produktionsprogramm) und Regelstrecke (Produktionsstruktur).

Im Fortgang sind Konfigurationskonzepte simulationsgestützt zu erstellen und für die Bewertung dem Einfluss verschiedener Veränderungsimpulse auszusetzen, um sie anschließend hinsichtlich ihrer Eignung und Resilienz zu beurteilen.

Ausgehend von der primären Planungsprämisse, dass eine Produktionsstruktur im Stande sein soll, einen definierten Durchsatz (Effektivität) zu erbringen, erscheint zunächst die Ermittlung ihres grundsätzlichen Leistungspotenzials bzw. dessen Suffizienz sinnvoll.

Für die Durchführung einer Simulationsstudie erfordert dies die Definition von Stell- (unabhängige Parameter) und Zielgrößen (abhängige Parameter). Im Rahmen der Betriebskennlinien-Theorie dient der Umlaufbestand als Einflussgröße, während Leistung und Durchlaufzeit als abhängige Kennwerte angesehen werden, obwohl eine wechselseitige Abhängigkeit aller drei Maßzahlen gemäß Trichterformel existiert [NYHU12]. Auf Grund des nichtlinearen Verhaltens realer Produktionssysteme und der Komplexität der Wechselwirkungen systemimmanenter Ereignisse ist eine direkte Einflussnahme auf das Bestandsniveau in der Praxis jedoch nicht möglich. Der Umlaufbestand kann daher durch die Steuerungsparameter des Systems (vgl. Abschnitt 3.1) nur mittelbar beeinflusst werden.

Um dennoch den systemischen Arbeitsvorrat in Form von freigegebenen Aufträgen sukzessive zu ändern, ist das Produktionsvolumen je Betrachtungszeitraum zu variieren. Dies kommt der extrinsischen Belastungsursache einer erhöhten Kundennachfrage gleich und deckt somit bereits die proportionale Mengenvariation des Produktionsprogramms ab. Besonders vor dem Hintergrund, dass die kapazitive Skalierbarkeit eine Hauptherausforderung für Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung darstellt (Abschnitt 3.1.3), erscheint diese Vorgehensweise zielführend.

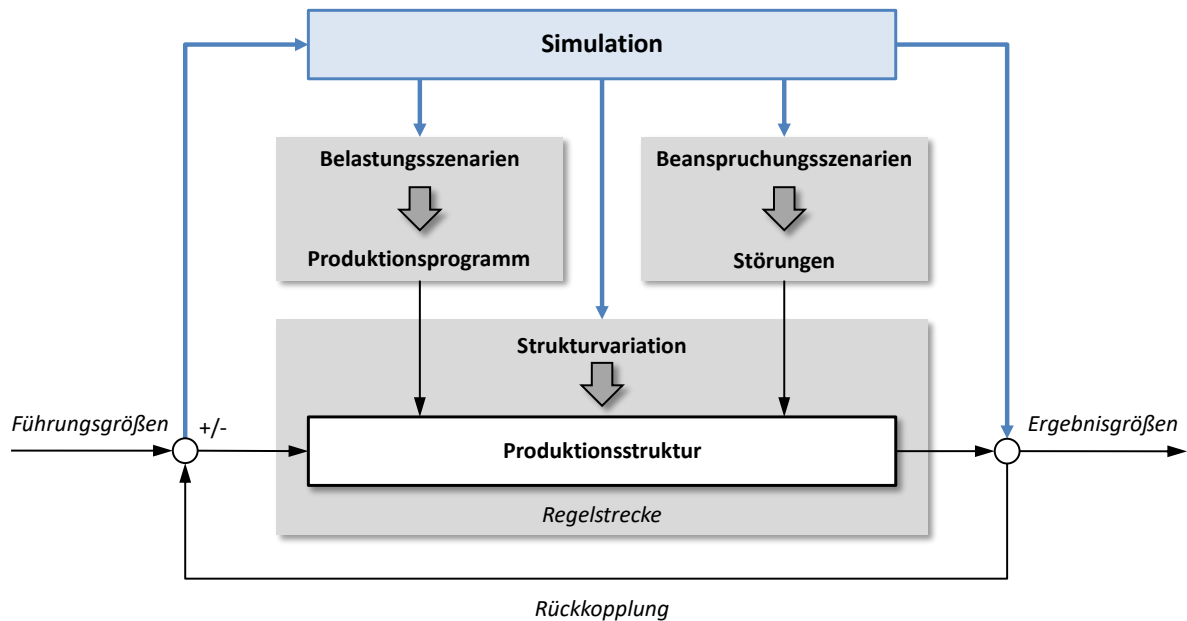


Abbildung 6-10: Strukturprüfung mittels Simulation von Systemszenarien

Dabei kann vereinfachend zunächst von einer durchschnittlichen Nivellierung des Produktionsprogramms ausgegangen werden, so dass die Auftragserzeugung in festen Zeitabständen und somit periodisch (gleichförmig-rhythmisch) erfolgt. Eine gleichförmige, rhythmische Belastungssituation spiegelt dahingehend einen angestrebten Zustand für das Produktionssystem dar, dass zeitraumbezogen nivellierte Arbeitsumfänge zyklisch freigegeben werden können (vgl. Abschnitt 3.2.2). Durch diskrete Variation des mittleren Einlastungsintervalls je Auftrag lässt sich die Leistungsgrenze des Produktionssystems in Form des erfüllbaren Produktionsvolumens ermitteln. Hierbei entscheidet einzig die mittlere Belastung darüber, ob das System ausgehend von seinem strukturimmanenten Potenzial (Systemzusammensetzung) über- oder unter- bzw. angemessen ausgelastet ist. Somit ermöglicht eine Variation der durchschnittlichen Einlastung, das Verhalten bei unterschiedlichen Lastsituationen und somit die Leistungsfähigkeit der Produktionsstruktur zu bestimmen.

Ein Sonderfall besteht beim Vorliegen bestands- oder belastungsregelnder Steuerungsverfahren. Unter der Voraussetzung, dass stets ausreichend potenzielle Aufträge existieren (grundsätzliche Überlast-Situation mit Blick auf die Auftragserzeugung), ist zusätzlich eine diskrete Variation der Belastungs- bzw. Bestandgrenze (intrinsische Belastungsursache) erforderlich. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Grenzwerte für die Freigabe an Aufträgen hinsichtlich des abzubildenden Produktionsvolumens ein angemessenes Maß aufweisen. Ansonsten würde sich der Umlaufbestand (freigegebene Aufträge) trotz erhöhter Kundennachfrage (erzeugte Aufträge) im Produktionssystem nicht physisch erhöhen. Zur Ermittlung angemessener Belastungsgrenzen wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen [NYHU12], [LÖDD08], [JODL08], [NYHU08], [BECH84].

Um die weiteren relevanten Belastungsverläufe im Bereich der variantenreichen Serienfertigung abzubilden, erscheinen folgenden Betrachtungen hinsichtlich des Kundenverhaltens und der daraus resultierenden Einlastungsintervalle sinnvoll:

- ungleichförmig-rhythmisch
- ungleichförmig-unrhythmisch

Ein saisonal schwankender Verlauf wird über ungleichförmige, rhythmische Einlastungen abgebildet und stellt eine Mengenvariation innerhalb einer Planungsperiode dar. Unabhängig von der jeweiligen Branche oder des konkreten Produktes lässt sich dieser durch eine Sinusfunktion approximieren (vgl. [KRÜG04]). Dabei sollte das Produktionssystem in der Lage sein, die durchschnittlich eingehende Belastung (grundsätzliche Eignung der Systemkonfiguration) sowie die zeitweisen Unter- und Überlastsituationen (Resilienzanforderung) zu bewältigen.

Ein typisches, unvorhersehbares Kundenverhalten bildet die Exponentialverteilung ab. Sie repräsentiert ungleichförmige, unrythmische Einlastungsintervalle in einem bestimmten Betrachtungszeitraum.

Mit Hinblick auf relevante Störereignisse liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf Engpass-Arbeitsystemen, weil sie die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems begrenzen. Folgende Situationen erscheinen bei der systemischen Betrachtung bedeutsam:

- Nicht-Verfügbarkeit von Kapazitäten (z. B. Ausfall eines Betriebsmittels eines Maschinenpools, Komplettausfall einer Technologie)
- Leistungsminderung von Ressourcen (z. B. verlangsamte Bearbeitungsgeschwindigkeit)
- Nicht-Verfügbarkeit von Material (z. B. fehlendes Rohmaterial oder Lieferschwierigkeiten bei externen Bearbeitungsumfängen)

Während sich fehlendes Material, unabhängig von dessen Anarbeitungszustand, zwangsläufig negativ auf die Durchlaufzeit der betroffenen Produktgruppe auswirkt, betrifft sowohl die mangelnde Verfügbarkeit als auch ein reduzierter Leistungsgrad der technischen und/oder personellen Ressourcen eine Verminderung des Kapazitätsangebots des Produktionssystems. Letzteres impliziert eine Senkung der Leistung bzw. des Durchsatzes sowie eine daraus resultierende Erhöhung des Umlaufbestandes bei gleichbleibender Auftragseinlastung.

6.2.2 Systematische Versuchsplanung

Die Beurteilung der Eignung einer Struktur hinsichtlich der effektiven und effizienten Funktionserfüllung findet somit anlassbezogen auf Grund von (absehbaren) Veränderungen des Produktionsprogramms, der betrieblichen Zielstellungen oder der Rahmenbedingungen statt. In diesem Zuge erfolgt nicht nur eine Überprüfung der strukturellen Tauglichkeit des bestehenden Produktionssystems im Sinne der Wirtschaftlichkeit, sondern ebenso die Ermittlung der leistungsorientierten Resilienz, um auf potenzielle Störsituationen vorbereitet zu sein. Zusätzlich wird das Systemverhalten fortwährend überwacht, um bei störungsbedingten Abweichungen umgehend eingreifen zu können. Sofern die Auswirkungen nicht unmittelbar ersichtlich sind, kann ebenso bereits das Auftreten einer Beeinträchtigung Anlass zum Ergreifen adäquater Maßnahmen sein.

Bei Identifikation eines strukturellen Adaptionspotenzials, stellen diese Veränderungsimpulse jeweils den Anstoß für eine simulationsgestützte Überprüfung wahrscheinlicher Systemszenarien dar. Zur Erstellung dieser Grundmodelle ist auf Basis der im vorherigen Abschnitt thematisierten Ermittlung der grundsätzlichen Leistungsfähigkeit des betrachteten Produktionssystems eine systematische Versuchsdurchführung notwendig. Die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit der einzelnen Parameterkonstellationen und damit die Entscheidung über die Sinnhaftigkeit bestimmter Versuche verbleibt letztlich beim Planer mit seinen Kenntnissen und Erfahrungen. Unabhängig davon bieten die nachfolgenden Ausführungen eine Anleitung zur strukturierten Erstellung konkreter Systemszenarien, indem sie die als wesentlich identifizierten Einfluss- und Stellgrößen mit ihren Ausprägungen gliedern.

Ausgangspunkt der Betrachtungen stellen die Variationen der Produktionsaufgabe und damit der Systembelastung dar. Sie resultieren aus den Fluktuationen der Kundennachfrage. Hierbei existieren gemeinhin drei Arten der Änderungen des Produktionsprogramms:

- Variation des Produktionsvolumens (proportionale Änderung der Auftragsmengen)
- Änderung der Auftragsfolge bzw. des Bedarfsverlaufs
 - Nivellierung der Einlastung (rhythmisch-gleichförmig)
 - Saisonalität der Einlastung (rhythmisch-ungleichförmig)
 - Zufällige Einlastung (unrhythmisch-ungleichförmig)
- Variation des Produktmixes (Änderung der Teilevielfalt oder disproportionale Mengenänderungen)
 - Erhöhung des prozentualen Anteils ausgewählter Produktarten unter Beibehaltung oder Veränderung der Gesamtbelastung des Systems
 - Verminderung des prozentualen Anteils ausgewählter Produktarten unter Beibehaltung oder Veränderung der Gesamtbelastung des Systems

Besonders die Entwicklung von Störszenarien, mit ihrer Auswirkung auf die Eigenschaften des Produktionssystems, bietet auf Grund der Komplexität der variantenreichen Serienfertigung großen kreativen Spielraum. Dennoch soll an dieser Stelle eine grundlegende Systematisierung erfolgen. Hinsichtlich interner Störgrößen lassen sich folgende Fälle mit Blick auf den teilweisen oder vollständigen Ausfall der personellen und technischen Ressourcen zusammenfassen:

- Behebbarer Ausfälle (Produktion ohne jegliche Ausfallzeiten unrealistisch)
- Totalausfall eines ausgewählten Arbeitsmittels
 - Arbeitsmittel mit durchschnittlich höchster Auslastung (Durchsatz-Engpass)
 - Arbeitsmittel, über das die meisten Produktarten laufen (stärkste Beeinflussung)

Bei den externen Störungsursachen stehen Probleme mit dem Lieferanten (insbesondere bei Fremdvergabe von Fertigungsumfängen) und bestimmte Kundenwünschänderungen in der laufenden Produktion im Mittelpunkt:

- Lieferantenschwierigkeiten:
 - Verzögerungen bei fremdvergebenen Leistungen
 - Qualitätsprobleme des Zulieferers
- Kundenwünschänderungen:
 - Erzeugnisänderungen (Änderung der Produktart)
 - Stückzahländerungen/Stornierung (Änderung der Auftragsmenge)
 - Terminänderungen (Reihenfolgeänderung durch Eilaufträge)

Insbesondere die Kundenwünschänderungen lassen sich auch als kurzfristige Fluktuationen auffassen.

Für die Adaption der einzelnen Strukturebenen bestehen fabrikplanerisch die meisten Variationsmöglichkeiten. Auf Basis der zuvor definierten Konfigurationsparameter erfolgt deshalb an dieser Stelle die Beschränkung auf die wesentlichen Einflussbereiche und ihre Ausprägungen. Die Ausgestaltung der funktionalen Struktur unterliegt im Rahmen dieser Arbeit einer strategischen Entscheidung und fällt somit nicht in den Einflussbereich der Leistungseinheit. Dennoch besteht die Option bei entsprechender Tendenz der zugehörigen Indikatoren, speziell bei geplanter Segmentierung des Produktionssystems, unterschiedliche Alternativen der jeweiligen Systemzusammensetzung zu prüfen.

Hinsichtlich der zeitlichen Struktur können die einzelnen Stellgrößen grundsätzlich folgendermaßen variiert werden:

- Teilefluss:
 - Weitergabe ganzer Lose (Reihenverlauf)
 - Weitergabe von Teilloosen (kombinierter Verlauf)
 - Einzelteilweitergabe (Parallelverlauf)
- Reihenfolgebildung: beliebige Festlegungen möglich [LÖDD08], [JODL08]
- Auftragseinlastung:
 - sofort
 - terminorientiert
 - kapazitätsorientiert
 - nach Bestand/Belastung
 - nach Leistung/Auslastung
 - nach Rückstand

Für die räumliche Struktur ergibt sich die ideale Anordnung der Ressourcenelemente bereits durch Anwendung der passenden Heuristik oder Optimierungsroutine auf Basis der Materialflussmatrix. Hierbei entfaltet sich das kreative Potenzial des Planers vor allem bei der konkreten Ausgestaltung.

Insofern besteht der weitere gestalterische Spielraum hinsichtlich der Aufbaustruktur in der Variation der Verkettung der einzelnen Arbeitssysteme:

- starre Verkettung ohne Puffer
- elastische Verkettung mit begrenzter Pufferkapazität
- lose Verkettung mit unbegrenzter Pufferkapazität

In Abhängigkeit von der Proportionalität der produktspezifischen arbeitssystembezogenen Belastungen und der gewählten Art der Verkettung besteht hinsichtlich der Kontinuität die Möglichkeit, die Weitergabe der Arbeitsgegenstände mit oder ohne Taktung vorzunehmen.

Anstatt einzelne Stellhebel der zeitlichen Struktur zu variieren, wird häufig das eingesetzte Steuerungsverfahren geändert. Dies zieht entsprechend eine Modifikation gleich mehrerer Parameter nach sich.

Dank der Generierung kontinuierlicher Ergebnisgrößen sind anschließend u. a. Aussagen dahingehend möglich, wie resilient die Systemkonfiguration ist. Zudem unterstützt das Vorgehen die Bewertung unterschiedlicher Produktionsstrukturen hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung eines vorgegebenen Produktionsprogramms bei unterschiedlichen Auftragssituationen und Umweltbedingungen, da sowohl ihre Effektivität (Erreichung der Leistungsziele) als auch ihre Effizienz (Aufwandsbetrachtung bei angestrebter Leistungsfähigkeit) quantifiziert werden.

6.3 Resilienzorientierte Bewertung von Strukturalternativen

Es bedarf eines gemeinsamen Wertmaßstabes bei der Bewertung der Strukturalternativen, um die Konzepte der Resilienz und der strukturellen Eignung miteinander zu verbinden. Insbesondere vor dem Hintergrund der konfliktären Zielstellung, auf der einen Seite eine möglichst effiziente Leistungserbringung zu gestalten und auf der anderen Seite gegenüber unerwarteten Ereignissen gewappnet zu sein, bietet sich eine differenzierte Aufwand-Nutzen-Betrachtung an, die sowohl den Kosten eines Strukturkonzeptes als auch seiner resilienzorientierten Leistungsfähigkeit Rechnung trägt.

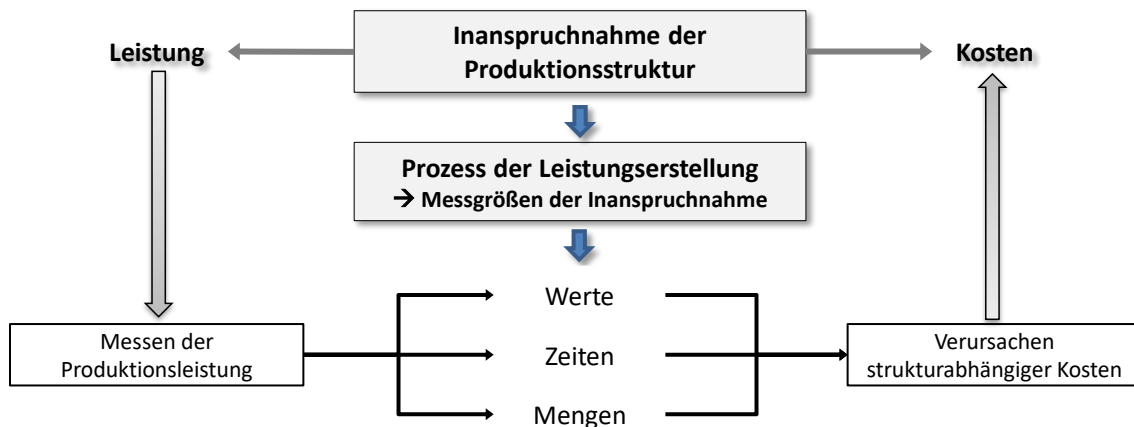


Abbildung 6-11: Kostenverursachung durch Inanspruchnahme der Produktionsstruktur

Zu diesem Zweck erfolgt die leistungsorientierte Betrachtung der Inanspruchnahme der Produktionsstruktur vom dem Hintergrund des zu bewältigenden Produktionsprogramms. Dabei stehen sich die erbrachte Leistung und die daraus entstandenen Kosten gegenüber (Abbildung 6-11). Es gilt daher im Fortgang, auf Basis der Messung der Leistungserstellung mittels geeigneter Kenngrößen auf die Verursachung strukturabhängiger Kosten zu schließen.

6.3.1 Identifikation von Kostentreibern

Die Darlegung der unterschiedlichen Kennzahlen einzelner Strukturdimensionen zeigt (Abschnitt 3.2), dass für einzelne strukturelle Aspekte durchaus monetäre Aufwandsgrößen vorliegen. Es bedarf allerdings einer einheitlichen Bewertungsbasis, um die durch die Produktionsstruktur verursachten Kosten systematisch zu erfassen und so verschiedene Strukturkonzepte miteinander vergleichen zu können. Dazu sind nachfolgend die strukturelevanten Aufwände zu identifizieren und die maßgeblichen Kostentreiber hinsichtlich der Inanspruchnahme des Leistungspotenzials zuzuordnen (Abbildung 6-12).

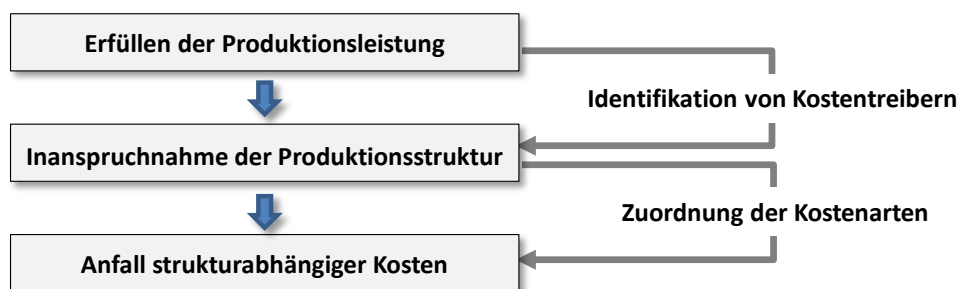


Abbildung 6-12: Ansatz zur Ermittlung strukturabhängiger Kosten

Die anfallenden monetären Bestandteile einer Produktionsstruktur sind zunächst zu trennen in Bereitschaftskosten (Kosten der Funktionsbereitstellung) und Leistungskosten (Kosten der Funktionserfüllung). Erste sind nur mittel- bis langfristig disponierbar und stellen somit Fixkosten für die Ausstattung eines Produktionssystems dar, ohne die ein Betreiben nicht möglich ist und somit keine Produktionsleistung erbracht werden kann. Dagegen besitzen die Kosten der Funktionserfüllung einen kurzfristigen Charakter. Sie hängen unmittelbar von den Aktivitäten der Leistungserstellung und der tatsächlich in Anspruch genommenen Kapazität ab.

Nachfolgend werden die wesentlichen Aufwandstreiber den einzelnen Strukturebenen zugeordnet (vgl. [AGGT90], [JAIN93], [MÖSS99], [KERN02]).

Die funktionale Struktur legt die grundsätzliche Systemzusammensetzung fest und definiert somit die Bereitschaftskosten über die Art und Anzahl der personellen sowie technischen Ressourcenelemente. Zudem bestimmt sie durch Bildung von Leistungseinheiten die jeweilige Systemgrenze in Form einer baulichen Hülle (Gebäude) und zugehöriger Flächen.

Die räumliche Struktur der ortsgebundenen Ressourcen beeinflusst die Leistungskosten, die während des Betriebs des Systems anfallen. Durch die Festlegung der Anordnung und der Flächendimensionierung einzelner Arbeitssysteme entsteht bei Umsetzung eines bestimmten Produktionsprogramms ein Transportaufwand. Darüber hinaus begrenzen die Art der Verkettung und die Dimensionierung der Lagerflächen ggf. den Umlaufbestand, der sich im Produktionssystem befinden kann. Somit bestimmt die räumliche Struktur die transportbedingten Übergangszeiten und Puffergrößen zwischen den Arbeitssystemen.

Mit der Definition der Art des Durchlaufs der beweglichen Ressourcenelemente (zumeist Material im Sinne des Arbeitsgegenstandes) legt die zeitliche Struktur im Wesentlichen die Aufwände der Leistungserbringung fest. Ausgehend von der Wahl der räumlichen Struktur betrifft dies zum einen die konkret anfallenden Transportkosten und zum anderen die Lagerhaltungskosten des Umlaufbestandes. Beide Kennwerte sind abhängig von der Transport- bzw. Bearbeitungslosgröße. Darüber hinaus fallen während des Betriebes Fertigungs- und Personalkosten für die Nutzung der personellen und technischen Ressourcen sowie Materialkosten für die Arbeitsgegenstände (Einzelteile, Baugruppen) an. Zusätzlich entstehen Aufwände zum Planen und Steuern der Produktionsprozesse.

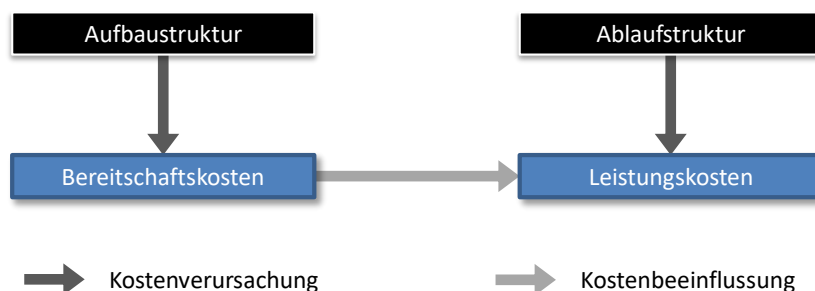


Abbildung 6-13: Strukturabhängiger Zusammenhang von Kostenverursachung und -beeinflussung

Damit lässt sich konstatieren, dass die Aufbaustruktur maßgeblich kostenverursachend hinsichtlich der Bereitschaftskosten, d. h. der fixen Kosten, des Produktionssystems ist (Abbildung 6-13). Zusätzlich beeinflusst sie über die räumliche Struktur die Leistungserstellungskosten. Die Ablaufstruktur prägt letztlich das Systemverhalten mit seinen leistungsvariablen Kosten. Dabei definiert der resultierende Betriebspunkt mit seinen Leistungs- und Zeitkenngrößen (Durchlaufzeit, Termintreue) den Nutzenbeitrag des Produktionssystems und letztlich den Markterfolg der hergestellten Erzeugnisse.

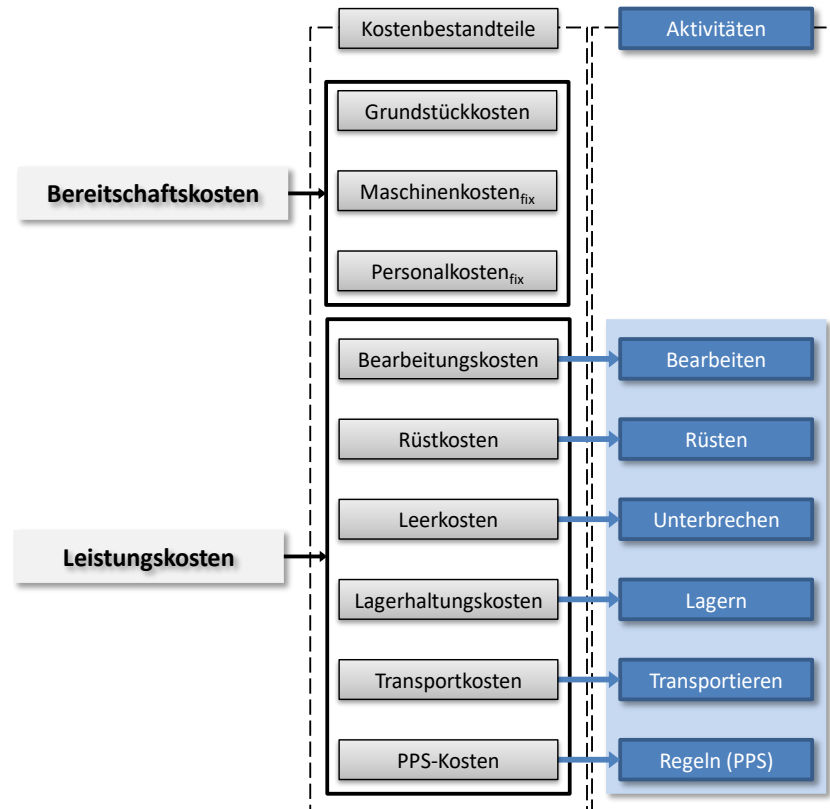


Abbildung 6-14: Relevante Strukturkosten

Um nun eine monetäre Bewertung der Eignung von Produktionsstrukturen durchzuführen, bedarf es der eindeutigen Zuordnung von kostentreibenden Einflussfaktoren zu den jeweiligen strukturabhängigen Kosten. Dementsprechend sind neben den statischen vor allem die ergebnisorientierten Kenngrößen zu identifizieren, die maßgeblich die monetären Aufwände eines Produktionssystems verursachen.

Die Strukturkosten, die die Systembereitschaft sicherstellen, hängen maßgeblich von der **Anzahl der unterschiedlichen technischen und personellen Ressourcen** ab. Dabei sind mit Hinblick auf die Potenzialfaktoren die permanenten Elemente, Arbeitskräfte und Arbeitsmittel, von den sich nur zeitweise durch das Produktionssystem bewegenden Arbeitsgegenständen (Aufträge) zu differenzieren. Insofern unterscheidet sich die Ressourcensicht der Produktionsstruktur (Aufbaustruktur) von der Auftragsicht des Systemverhaltens (Ablaufstruktur) bzw. seiner Ergebnisgrößen. Steht letztere im Mittelpunkt, bilden die **Gesamtzahl aller Aufträge** (Arbeitsgegenstände) bzw. die aus ihnen resultierende Belastung des Produktionssystems den wesentlichen Einflussfaktor auf den Aufwand zur Leistungserstellung. Dies betrifft nicht nur den physischen Produktionsprozess, sondern auch die Unterstützungsaktivitäten zur Planung und Steuerung des Strukturbetriebs. Unabhängig von den bereits aufgeführten Kostentreibern beeinflussen die unterschiedlichen **Zeitanteile** für die Aktivitäten zur Erbringung der geforderten Leistung, d. h. die zeitliche Inanspruchnahme der Potenzialfaktoren des Produktionssystems, entscheidend, welcher Aufwand dabei entsteht (Abbildung 6-14). Aus diesem Grund wird dieser Aspekt einer tiefergehenden Untersuchung unterzogen.

Hinsichtlich der technischen und personellen Ressourcen bieten die Ablaufarten der Refa-Methodenlehre eine fundierte und in der betrieblichen Praxis etablierte Basis der Zustandskategorisierung [REFA06], [REFA91], [REFA93a]. Für Arbeitskräfte als Potenzialfaktor veranschaulicht Tabelle 6-1 die wesentlichen Einteilungen.

Tabelle 6-1: Zustände des Potenzialfaktors Mensch

Arbeitskraft/Mensch		
im Einsatz	Tätigkeit	Haupttätigkeit
		Nebentätigkeit
	Unterbrechen der Tätigkeit	ablaufbedingt
		störungsbedingt
		erholungs- oder persönlich bedingt
außer Einsatz		
Betriebsruhe		

Analog dazu bietet Tabelle 6-2 einen Überblick über die Ablaufarten technischer Ressourcen. Die Produktionsfaktoren Arbeitskraft und Arbeitsmittel sind direkt voneinander abhängig. Auf Grund ihrer Fähigkeiten innerhalb des Transformationsprozesses zumeist in Kombination wertschöpfend zu agieren, besteht eine hohe Konformität beider Systematiken.

Tabelle 6-2: Zustände des Potenzialfaktors Maschine

Arbeitsmittel/Maschine		
im Einsatz	Nutzung	Hauptnutzung
		Nebennutzung
	Unterbrechen der Nutzung	ablaufbedingt
		störungsbedingt
		erholungs- oder persönlich bedingt
außer Einsatz		
Betriebsruhe		

Im Einsatz befinden sich technische und personelle Ressourcen, wenn sie während der festgelegten Betriebszeit zur Erfüllung der vorgesehenen Arbeitsaufgaben zur Verfügung stehen [REFA06]. Hierbei werden **Haupt- von Nebentätigkeit** bzw. -nutzung unterschieden. Erstere beschreibt die unmittelbar wertschöpfenden Prozesse am Arbeitsgegenstand. Nebentätigkeiten sind geplante Aktivitäten, die allerdings nur indirekt der Arbeitsaufgabe dienen. Darüber hinaus existieren noch zusätzliche Tätigkeiten, deren Auftreten und Ablauf nur bedingt vorhersehbar sind. Das persönlich sowie erholungsbedingte **Unterbrechen** der Nutzung des Arbeitsmittels ist stets durch die Arbeitskraft verursacht. Eine ablaufbedingte Unterbrechung erfolgt planmäßig, z. B. im Zuge des Abkühlens bei Glühprozessen, und ergibt sich auf Grund zeitlich unterschiedlicher Abläufe bei Arbeitskraft und Arbeitsmittel. Hingegen treten technisch-organisatorische Beeinträchtigungen sowie der Mangel an Informationen demzufolge unplanmäßig auf (vgl. Abschnitt 2.3.2) und führen dazu, dass die beabsichtigte Tätigkeit störungsbedingt unterbrochen wird [REFA06].

Im Gegensatz dazu stehen die betrachteten Potenzialfaktoren während der Betriebszeit z. B. wegen Krankheit, Urlaub (Mensch) oder längeren Instandhaltungsarbeiten (Maschine) nicht zur Verfügung, wenn sie **außer Einsatz** sind [REFA06]. Insbesondere die Grenzen zwischen störungsbedingten Unterbrechungen und Inaktivität (außer Einsatz) einer Ressource sind mitunter fließend und werden im Fortgang subsummiert. Die **Betriebsruhe** bezeichnet gesetzlich, tariflich oder betrieblich geregelte Zeiten, in denen nicht gearbeitet wird [REFA06].

Zwar existiert eine vergleichbare Systematik auch für den Arbeitsgegenstand, jedoch hat sich in der Produktionswirtschaft und Betriebsorganisation eine daran angelehnte Version durchgesetzt. Basierend auf der Auftragszeit lässt sich für den Arbeitsgegenstand die Durchlaufzeit ermitteln [NYHU12], [REFA06]. Tabelle 6-3 zeigt die einzelnen Zustände und deren Zeitanteile, die ein Auftrag im Produktionsprozess annehmen kann.

Tabelle 6-3: Zustände und Zeitanteile des Potenzialfaktors Material

Arbeitsgegenstand/Material				
Liegen nach Bearbeiten ≅ Liegen vor Transport (Bestandspuffer)	Transport	Liegen nach Transport ≅ Liegen vor Bearbeiten (Bedarfspuffer)	Rüsten	Bearbeiten
Übergangszeit			Durchführungszeit	
Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs				

Folgende Zustände lassen sich dabei in der Regel eindeutig identifizieren: **Bearbeiten, Lagern und Transport** [KUPR91]. Obwohl streng genommen zwischen Liegen (Aufenthalt des Arbeitsgegenstandes im Produktionsbereich) und Lagern (Aufbewahren in Lagerbereichen) unterschieden wird [REFA06], besitzt diese Differenzierung für die weiteren Betrachtungen keine Relevanz, da sich jeweils Bestände anhäufen. Daher werden beide Begriffe im Rahmen dieser Arbeit simultan verwendet. Hierbei hängt es von der zeitlichen Struktur und insbesondere von der Art der Teileweitergabe ab, ob die Arbeitsgegenstände vor oder nach der Bearbeitung gelagert werden.

Da ein Auftrag mitunter eine Vielzahl gleichartiger Teile beinhaltet, die als Los zusammengefasst sind, entspricht die Bearbeitungszeit einem Vielfachen der einzelnen Ausführungszeit. Somit hängt die Bearbeitungszeit eines Auftrags von der gewählten produktspezifischen Losgröße ab. Unter Kenntnis der Gesamtstückzahl des Erzeugnisses lässt sich daraus die **Losanzahl** bestimmen. Diese definiert, wie oft insgesamt die Rüstzeit anfällt.

Wegen der Ähnlichkeit der Zustandsbeschreibung für technische und personelle Ressourcen wird zur Vereinfachung nachfolgend die Kongruenz beider Potenzialfaktoren im Sinne einer Synchronität der Aktivitäten angenommen, d. h. Wartezeiten der Arbeitskraft entsprechen Leerzeiten des Arbeitsmittels (**Abgrenzung**: keine Mehrmaschinenbedienung). Der Fokus liegt im Fortgang auf der maschinenbezogenen Beschreibung. Während der Auftrags- bzw. Belegungszeit sind Arbeitsgegenstand und Arbeitsmittel sowie Arbeitskraft bei der Betrachtung zeitlich gekoppelt. Demzufolge existiert eine eindeutige Zuordnung der entsprechenden Zustände (Abbildung 6-15). Die Nebennutzung bezeichnet dabei den Rüstvorgang als Vorbereitung für die Bearbeitung, welche die Hauptnutzung der Maschine darstellt. Hierbei fallen arbeitsmittelspezifisch zum einen Rüst- und zum anderen Fertigungskosten für den jeweiligen Zeitraum an. Aus Sicht des Arbeitsmittels kommt es, sofern im direkten Anschluss kein erneutes Umrüsten folgt, zur Unterbrechung seiner Nutzung. Für diese Dauer entstehen Leerkosten aus den Fixkosten der nicht genutzten Kapazität [OLFE10]. Die zeitliche Struktur soll in diesem Zusammenhang dafür sorgen, dass solche kapazitiven Verluste nicht entstehen, indem die Ausführungszyklen unmittelbar aufeinander folgen. Aus Sicht des Auftrags verursacht sein Transport entsprechende Kosten. Die Liegezeit erzeugt zudem Lagerhaltungskosten. Auch hier soll die Ablaufstruktur das Liegen von Arbeitsgegenständen reduzieren. Die räumliche Struktur beeinflusst hingegen neben der Größe der Lagerflächen die Transportentfernungen und somit die dadurch entstehenden Kosten.

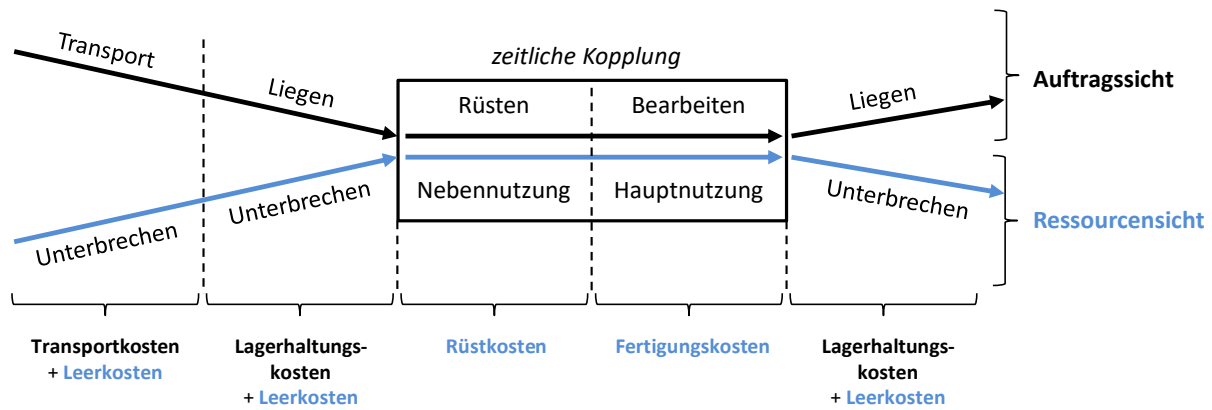


Abbildung 6-15: Kopplung von Auftrags- und Ressourcensicht

6.3.2 Zuordnung strukturabhängiger Kosten

Nach der Identifikation der Kostentreiber sind die konkreten Auswirkungen auf die einzelnen Kostenbestandteile hinsichtlich einer durchgängigen monetären Bewertung von Produktionsstrukturen zu bestimmen. Daher werden nachfolgend die strukturabhängigen Kosten in ihrer Abhängigkeit von der Inanspruchnahme der installierten funktionalen, räumlichen und zeitlichen Struktur auf Basis des Systemverhaltens (Leistungserstellungsprozess) ermittelt. Hierbei geht es keineswegs darum, alle anfallenden Kosten zu erfassen, vielmehr sollen nur die wesentlichen Faktoren im Zusammenhang mit der konkreten strukturellen Ausgestaltung eines Produktionssystems Berücksichtigung finden.

Die statischen Strukturkosten (Bereitschaftskosten) ergeben sich aus der Aufbaustruktur. Sie sind relevant, sollte es zu Änderungen der funktionalen oder räumlichen Strukturebene kommen. Der Kostentreiber dieser als fix angenommenen Aufwände ist ausschließlich ihre Systemzugehörigkeit. Die wesentlichen Kostenkategorien werden nachfolgend aufgeführt [AGGT90], [HANS01], [HOIT07]:

- Gebäude-/Flächenkosten,
- fixe Arbeitsmittel-/Maschinenkosten (Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen, Raumkosten),
- fixe Personalkosten der Arbeitskräfte (insbesondere bei Zeitentlohnung) und
- Lagerhaltungskosten für fixe Bestände (z. B. bei Kanban oder Bestellbestandsverfahren).

Der Gesamtaufwand hängt dabei von der Anzahl der jeweiligen Ressourcenelemente sowie den Ausmaßen der begrenzenden Hülle bzw. Fläche der Leistungseinheit ab. Für die Grundstücks-/Gebäudekosten lassen sich bei Kauf der Immobilien bzw. Flächen Kapitalbindungskosten z. B. (50% des Investitionswertes) zzgl. kalkulatorischer Abschreibungen (Basis: Wiederbeschaffungswert) respektive die anteiligen Mietkosten ansetzen. Es könnten auch Opportunitätskosten in Form kalkulatorischer Zinsen auf alle mit dem aktuellen m²-Preis bewerteten Flächen herangezogen werden, sofern die betroffenen Bereiche ungenutzt bleiben. Da die übrigen monetären Aufwände ebenso einen Bezug zur Leistungserstellung haben können, werden sie im weiteren Verlauf an den entsprechenden Stellen detailliert erörtert. Die Gebäudekosten finden sich ebenso wie die fixen Maschinen- und Personalkosten als Teil der Fertigungsgemeinkosten (FGK) wieder (Abbildung 6-16).

Die dynamischen Strukturkosten, die im Rahmen der Leistungserstellung anfallen, haben unterschiedliche Aufwandstreiber. Deswegen werden die anfallenden Kostenbestandteile nach der jeweiligen Einflussgröße gruppiert [MÖSS99], [KERN02].

Zu den arbeitsmittelbezogenen Fertigungskosten zählen zum einen die Bearbeitungskosten und zum anderen die Rüstkosten. Erstere, die die produktive Inanspruchnahme der jeweiligen technischen Ressourcen ausdrücken, hängen einzig vom zeitlichen Gesamtproduktionsvolumen ab. Als Maschinenstundensatz werden für die geplante Nutzung der Kapazität als variable Bestandteile (variable arbeitsmittelabhängige Fertigungsgemeinkosten) Betriebsstoff-, Energie- und Werkzeugkosten sowie als zeitabhängiges Fixum (fixe arbeitsmittelabhängige Fertigungsgemeinkosten) anteilig Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen, Instandhaltungskosten und Raumkosten der jeweiligen Ressource subsumiert [OLFE10], [HERI14]. Für die Menge der vorhandenen Arbeitsmittel werden abschließend die Bearbeitungskosten addiert. Sie steigen proportional mit der Gesamtdauer der Bearbeitung und der Anzahl der Maschinen. Sofern keine Zeitentlohnung vorgenommen wird, bestimmt die Durchführungszeit die Personalkosten auf Grund der zeitlichen Kopplung mit der Maschinennutzung. Einzig die Anzahl der personellen Ressourcen stellen diesbezüglich einen weiteren Proportionalitätsfaktor dar, wobei an dieser Stelle von einer 1:1-Zuordnung von Arbeitskraft und Arbeitsmittel ausgegangen wird.

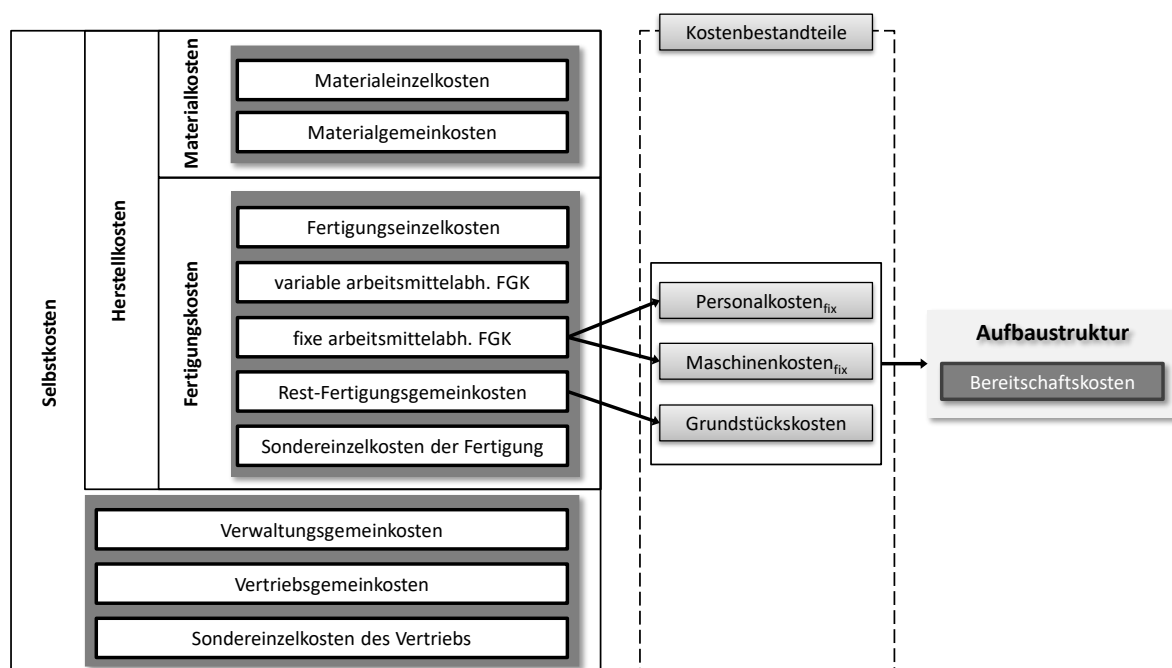


Abbildung 6-16: Kostenbestandteile der Aufbaustruktur

Die Rüstkosten können als Kapazitätsverlust durch das Umrüsten der Arbeitsmittel aufgefasst werden. Die hierbei in der betrieblichen Praxis oft verwendeten zeitlichen Kostensätze, sind allerdings in ihrer Berechnung nicht einheitlich geregelt. Darunter fallen grundsätzlich die Personal- und Sachkosten (Werkzeuge, Hilfsstoffe), die während des Rüstvorgangs entstehen und je nach Zurechenbarkeit zu den variablen oder fixen arbeitsmittelbezogenen Fertigungsgemeinkosten gehören. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Opportunitätskosten, die sich allerdings nicht in den Herstellkosten wiederfinden. Diese fallen zudem streng genommen nur an, wenn das Rüsten verhindert, dass auf dem Arbeitsmittel gefertigt wird und dadurch eine Verminderung der Kapazität entsteht, in deren Folge die Gesamtleistung des Systems leidet (vgl. [KERN02]). Die Menge der Rüstvorgänge, die in ihrer Dauer und monetären Bewertung produktspezifisch sein können, hängt direkt von der Anzahl der auf der betrachteten technischen Ressource aufgelegten Lose (Anzahl Bearbeitungslose) ab. Bei gleichbleibendem Gesamtproduktionsvolumen fallen die Rüstkosten in Abhängigkeit von der Losgröße degressiv.

Beim Unterbrechen der Tätigkeiten (bzw. der Nutzung eines Arbeitsmittels) fallen infolge der Nichtnutzung der Kapazität eines im Einsatz befindlichen Arbeitsmittels Leerkosten an. Diese beziehen den fixen Anteil der Maschinenkosten (arbeitsmittelbezogene Fertigungsgemeinkosten in Form von Abschreibungen, Zinsen, Raumkosten usw.) [OLFE10] mit ein und sind bereits in den Aufwänden der funktionalen Struktur enthalten (Abbildung 6-16). Sofern es zu keiner Änderung der Systemzusammensetzung kommt, bleibt dieser Kostenblock für das Gesamtsystem gleich. Allerdings ist aus Sicht des Verfassers in störungsbedingte und übrige Leerkosten zu differenzieren. Denn die Verminderung oder der Verlust der Leistungsfähigkeit eines Systemelementes (vertiefend hierzu [MATY05] oder [MEXI94]) beeinflusst den Unternehmenserfolg nachteilig [ALCA00]. Dabei lässt sich das wirtschaftliche Ausmaß betrieblicher Beeinträchtigungen prinzipiell über die dadurch entstandenen Kosten ermitteln. Dies beinhaltet entstehende direkte Leistungswiederherstellungskosten (z. B. störungsbedingte Instandsetzungskosten) und indirekte Kosten (vgl. [GERI81]). Mittelbar kommen die thematisierten Leerkosten auf Grund des Stillstands (beschäftigungsloses Bedienungspersonal oder nicht gedeckte Kapazitätskosten) sowie entgangene Deckungsbeiträge durch den Stopp der Produktion oder die Reduktion ihrer Geschwindigkeit zum Tragen. Dazu gehören auch Ausgaben für Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung von Folgekosten (Vorsorgekosten z. B. für vorbeugende Instandhaltungsaktivitäten), wobei diese zwar bedingt von der Art und Zahl der technischen Ressourcen abhängen, aber eher den strukturunabhängigen Gemeinkosten zuzurechnen sind (vgl. [GERI81]). Direkte Kosten betreffen das eingesetzte Personal, Material (z. B. Ersatzteile, Hilfsstoffe) sowie die benötigten Arbeitsmittel (Werkzeug, Vorrichtungen) im Zuge der aktiven Störungsbeseitigung. Die vollständige monetäre Bewertung von Störungen bezüglich der Leistungswiederherstellungs- und Folgekosten bedarf einer breiten Datenbasis, die bei typischen Betrieben der variantenreichen Serienfertigung nicht als gegeben vorausgesetzt werden kann. Da die Aufwände der bloßen Nichtnutzung von Kapazitäten bereits in den Kosten der Systemzusammensetzung Berücksichtigung finden, werden zur monetären Bewertung störungsbedingter Unterbrechungen zusätzlich Opportunitätskosten in Form entgangener Deckungsbeiträge (kein Bestandteil der Herstellkosten) infolge der Leistungsverluste mit einbezogen.

$$\text{Leerkosten}_{\text{störungsbedingt}} = \text{DB}_{\text{Stück}} \cdot \left(\frac{\text{Leerzeiten}}{\text{ZAU}_m} \right)$$

Dazu wird der Zeitanteil der störungsbedingten Nichtnutzung mit der durchschnittlich erforderlichen Ausführungszeit eines Produktes auf diesem Arbeitsmittel (ZAU_m) ins Verhältnis gesetzt und mit dem dazugehörigen Stück-Deckungsbeitrag ($\text{DB}_{\text{Stück}}$) bewertet. Damit ist eine Aussage möglich, welcher Wertverlust dadurch entsteht, dass mit der beeinträchtigten Kapazität weniger Erzeugnisse hergestellt werden können. Letztlich hängen die Leerkosten nicht nur von der Anzahl der technischen Ressourcen und ihrem zeitlichen Anteil an der Betriebszeit ab, sondern berücksichtigen auch störungsbedingte Opportunitätskosten.

Die allgemeinen Materialkosten umfassen das eigentliche Fertigungsmaterial (Rohstoffe), d. h. alle Werkstoffe, die direkt ins Produkt eingehen, Hilfs- (Materialien, die im Produktionsprozess verbraucht werden) und Betriebsstoffe (Materialien, welche für die Leistungserbringung benötigt werden, aber nicht in das Produkt eingehen) [AGGT90]. Für die weiteren Betrachtungen besitzen nur erstere Bedeutung. Hinsichtlich der spezifischen Kosten des Arbeitsgegenstandes fallen infolgedessen neben den Transportkosten vor allem Lagerhaltungskosten an [MÖSS99].

Letztere setzen sich aus Aufwänden für die Lagerung des Umlaufbestandes sowie die induzierte Kapitalbindung zusammen. Darunter werden auch die Tätigkeiten der Kommissionierung und Einlagerung der Arbeitsgegenstände sowie Verwaltung der Lagerbereiche in Form von z. B. Personalkosten, Abschreibungen oder Wagniskosten subsummiert (vgl. [KERN02]). Abhängig vom eingesetzten Produktionssteuerungsverfahren und der Dimensionierung der Puffergrößen zwischen den Arbeitssystemen gibt es quasi-fixe Bestände, die z. B. in Form des Sicherheitsbestandes oder befüllter Kanban-Behälter

vorliegen. Diese Materialvorräte bleiben weiterhin Teil des Umlaufbestandes und sind kostenrechnerischer Bestandteil der Materialgemeinkosten. Werte gelagerter Endprodukte finden sich hingegen in den Vertriebsgemeinkosten wieder. Neben der Lagerdauer und der Höhe des Umlaufbestandes spielen vor allem der angesetzte Zinssatz sowie der Wert der halbfertigen Produkte eine Rolle für die resultierenden Kosten. Zur Vereinfachung wird für den Auftragswert der erzeugnispezifische Materialpreis zzgl. des halben Wertschöpfungsumfangs angesetzt.

Die Transportkosten als Teil der arbeitsmittelunabhängigen Restgemeinkosten der Fertigung hängen unmittelbar von der Anzahl der Transporte (Anzahl der Transportlose), deren erforderlicher Dauer (bzw. alternativ der Transportstrecke) sowie der Zahl der eingesetzten Transportmittel ab. Darunter fallen auch die Aufwände für die nötigen Handhabungsvorgänge und Instandhaltungsaktivitäten der Transportmittel (vgl. [KERN02]). Die konkreten Transportkostensätze resultieren dabei aus der Wahl der eingesetzten Transportmittel, weswegen zum Zwecke der Vereinfachung die Beschränkung auf eine Art erfolgt.

Zusätzlich kommen ggf. noch Ausgaben der Fremdvergabe hinzu. Dabei beinhaltet der Rechnungsbetrag des externen Produktionspartners alle angefallenen Aufwände als Ersatz für die ansonsten intern verursachten Kosten der Leistungserstellung.

Für die Planung und Steuerung eines Produktionssystems fallen maßgeblich Personalkosten an. Daneben entstehen noch Aufwände z. B. in Form von Raumkosten, kalkulatorischen Zinsen, Kosten für Büromaterial. Die summarischen Kosten (Teil der Rest-Fertigungsgemeinkosten) steigen in der Praxis überproportional zu den zu planenden bzw. überwachten Aufträgen. Diesbezüglich stellt die Auftragsanzahl den entscheidenden Kostentreiber dar (vgl. [KERN02]). Einschränkend ist zu erwähnen, dass auch die Wahl des Steuerungsverfahrens (Kanban, BOA, MRP usw.), was die zeitliche Struktur betrifft, in Verbindung mit der Komplexität des Produktionssystems mitunter maßgeblichen Einfluss auf die Intensität und damit den Aufwand im Bereich Produktionsplanung und -steuerung hat (vgl. [LÖDD08], [BORN09], [KIEN11]). Vereinfacht wird hierfür die Anzahl der technischen Ressourcen als Indikator herangezogen. Es bleibt zu konstatieren, dass die Kosten der Produktionsregelung mit komplexer werdender Produktionsstruktur und zunehmendem Produktionsvolumen überproportional steigen [GRUN08]. Auf Grund der zunehmenden Kombinationsmöglichkeiten im Sinne der operativen Ressourcenallokation (Koordinationsaufwand) lässt sich ein exponentieller Zusammenhang beider Einflussfaktoren hinsichtlich des entstehenden Aufwands vermuten. In der betrieblichen Praxis gilt es, diesen durch ein geeignetes Steuerungsverfahren sowie passende EDV-Unterstützung zu reduzieren, so dass an dieser Stelle eine lineare Abhängigkeit der Kosten für das Regeln der Produktion von der Anzahl der Aufträge und der Anzahl der technischen Ressourcenelemente angenommen wird.

Abbildung 6-17 fasst die Kostenbestandteile der Ablaufstruktur zusammen.

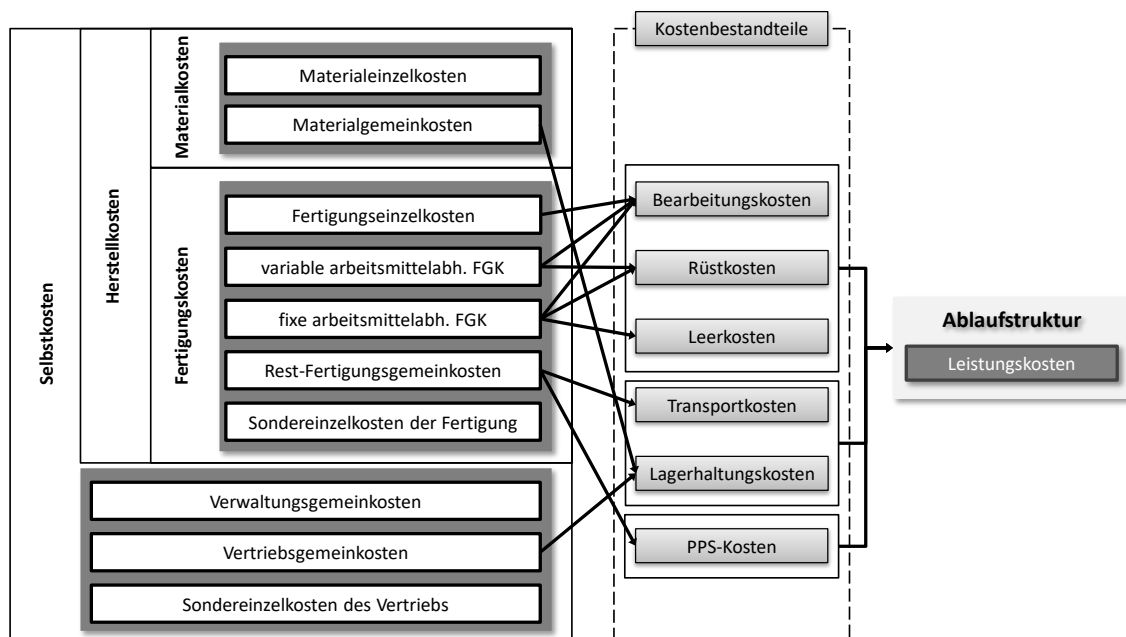


Abbildung 6-17: Kostenbestandteile der Ablaufstruktur

Die zusätzlichen Aktivitäten, die für das Betreiben eines Produktionssystems erforderlich sind (z. B. Beschaffung, Arbeitsvorbereitung, Verwaltung, Qualitätssicherung und Vertrieb), werden mit ihren Kosten nicht detailliert betrachtet, da sie zwar in die Herstell- bzw. Selbstkosten der Erzeugnisse eingehen, allerdings nicht von der Produktionsstruktur bzw. dem Betriebspunkt abhängen.

6.3.3 Systematische Kosten-Leistungsbeurteilung

Ausgehend von den vorangegangenen Betrachtungen ist es nun möglich, eine wertmäßige Beurteilung von Strukturkonzepten auf Basis struktureller Kosten durchzuführen. Diesbezüglich repräsentiert Abbildung 6-18 eine Aufstellung aller wesentlichen Einflussfaktoren.

Damit lassen sich zunächst die Kosten für eine bestehende Produktionsstruktur bewerten. Da gerade bei Änderungen der Kundennachfrage und entsprechenden Verschiebungen des Produktionsprogramms die Eignung eines Produktionssystems zur Bewältigung der veränderten Produktionsaufgaben in Frage gestellt wird, sind alternative Strukturkonzepte stets zusätzlich vor dem Hintergrund der Aufwände zur strukturellen Adaption zu beurteilen. Insofern bedarf die bestehende Systematik einer veränderungsorientierten Erweiterung.

Zu diesem Zweck ist nicht nur der Aufwand zum Verändern der Struktur in Form von Rekonfigurationskosten, sondern auch die relative Abweichung strukturabhängiger Kosten zu betrachten. Für eine Strukturadaption fallen vorrangig Investitionskosten an, die vom aktuellen Zinssatz und dem Investitionsvolumen abhängen [MÖSS99].

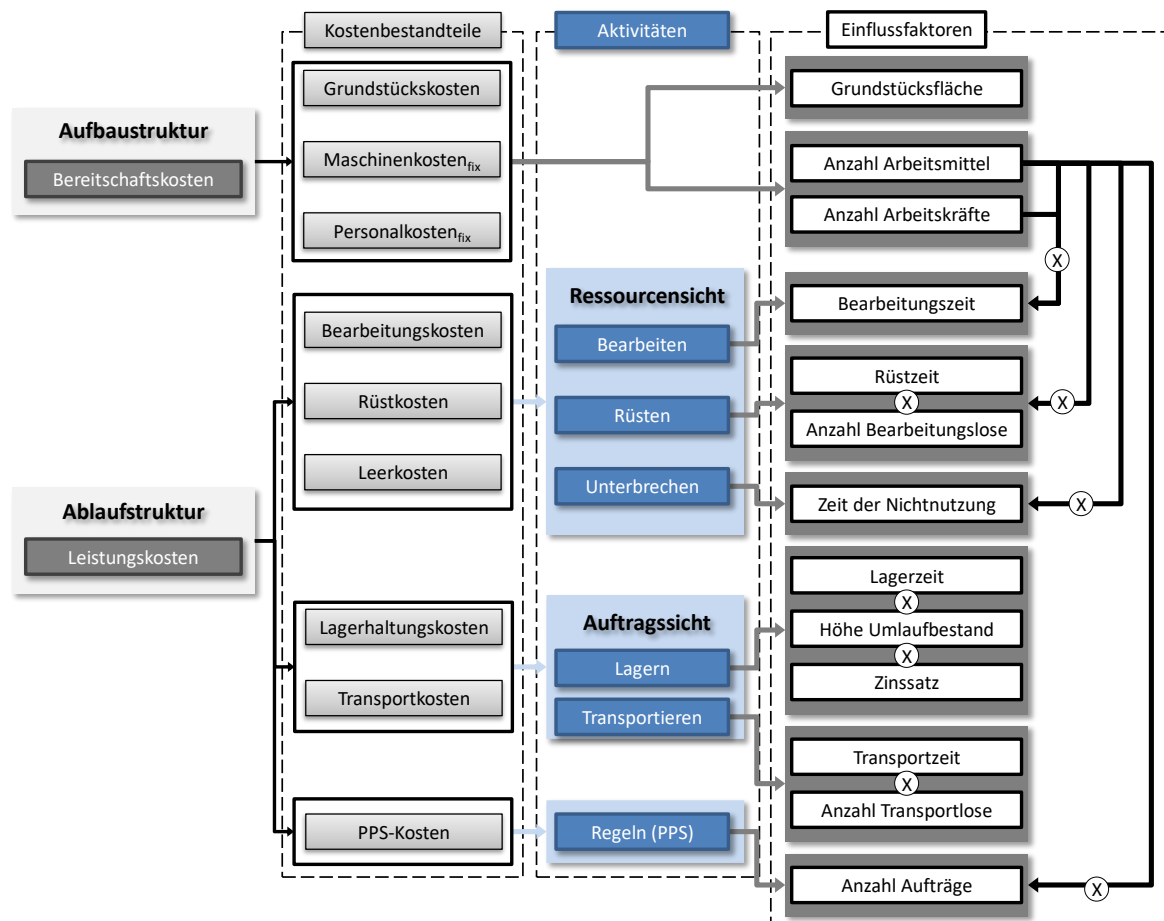


Abbildung 6-18: Einflussfaktoren und Bestandteile strukturabhängiger Kosten

Darüber hinaus zählen auch Planungskosten (hauptsächlich Personalkosten) für die Gestaltung der Strukturalternativen und Opportunitätskosten (z. B. in Form entgehender Deckungsbeiträge) für den Produktionsausfall während der Rekonfiguration des Systems dazu (vgl. [MÖSS99]). Die Kosten der Strukturadaption (Abbildung 6-19) sind dann vor dem Hintergrund zum einen ihrer absoluten Höhe (ausreichend Liquidität vorhanden?) und zum anderen der angestrebten Nutzungsdauer (Lebenszyklus) der veränderten Systemstruktur zu bewerten (vgl. [SEST03], [POHL14]).

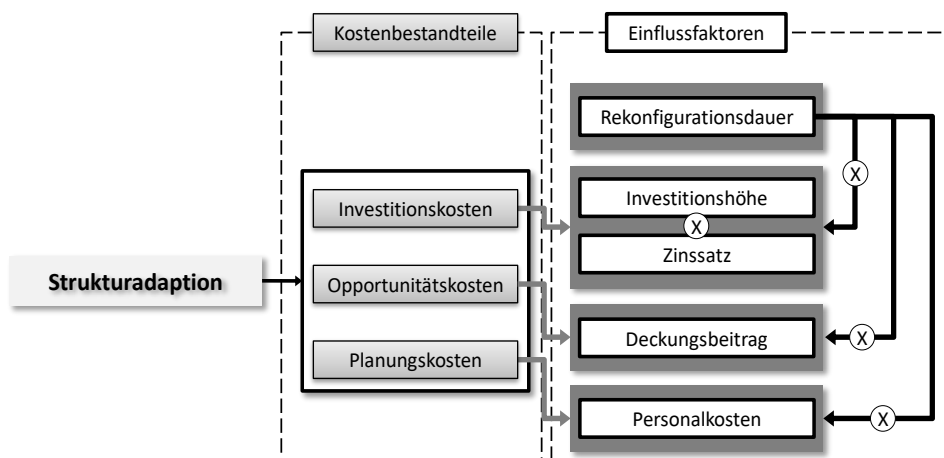


Abbildung 6-19: Kosten der Strukturadaption

Eine Rekonfiguration des Produktionssystems empfiehlt sich umso mehr, je schneller sich die Investitions- und Einmalkosten der Strukturanpassung durch die verringerten strukturabhängigen Kosten im Betrieb amortisieren lassen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind die zeitabhängigen Aufwände stets auf die gleiche Betrachtungsdauer zu beziehen. Somit ergeben sich die Strukturkosten (K_{Struktur}) für die Planungsperiode P unter Berücksichtigung des Zeitraums T als voraussichtlichen Lebenszyklus des Produktionssystems sowie in Anbetracht der Strukturadaption (K_{Adapt}) und der entstehenden Leistungs- (K_{Leistung}) und Bereitschaftskosten ($K_{\text{Bereitschaft}}$) folgendermaßen:

$$K_{\text{Struktur}}(P) = \frac{K_{\text{Bereitschaft}}}{T} \cdot P + K_{\text{Leistung}}(P) + \frac{K_{\text{Adapt}}}{T} \cdot P$$

Dabei sind die Aufwände sowohl für die Funktionsbereitstellung als auch für die Veränderung der Struktur auf die Dauer des Bestehens des Produktionssystems T als Amortisationszeitraum zu beziehen. Die zeitvariablen Leistungskosten hängen hingegen ausschließlich von der Dauer der Planungsperiode P ab.

Um die Resilienzanforderungen bei der Entscheidung zur Strukturadaption zu berücksichtigen, ist der monetäre Aufwand eines Strukturkonzepts über seine geplante oder voraussichtliche Nutzungsdauer ins Verhältnis zur seinem effektiven Leistungspotenzial zu setzen. Dadurch entsteht ein Effizienz-Kennwert, der sowohl der Wirtschaftlichkeit als auch den Variabilitätseigenschaften (Resilienz) des Produktionssystems Rechnung trägt:

$$\text{Resilienzorientierte Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Resilienz}}{\text{Strukturkosten}}$$

Dabei entspricht die Resilienz einer Produktionsstruktur ihrer Leistungsfähigkeit (Potenzial) auf Basis der bestehenden Produktionsaufgabe unter Beachtung prognostizierter produktionsprogrammbedingter Variationen und Abweichungen infolge von Störeinflüssen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Da die Resilienzbeurteilung stets die Effektivität des Leistungserstellungsprozesses voraussetzt (Suffizienz), ist die Erbringung der geforderten Durchsatzprämisse explizit gewährleistet. Solch ein Bewertungsverfahren ermöglicht die Auswahl von Adaptionentscheidungen anhand ihres Kosten-Leistungs-Verhältnisses (Abbildung 6-20).

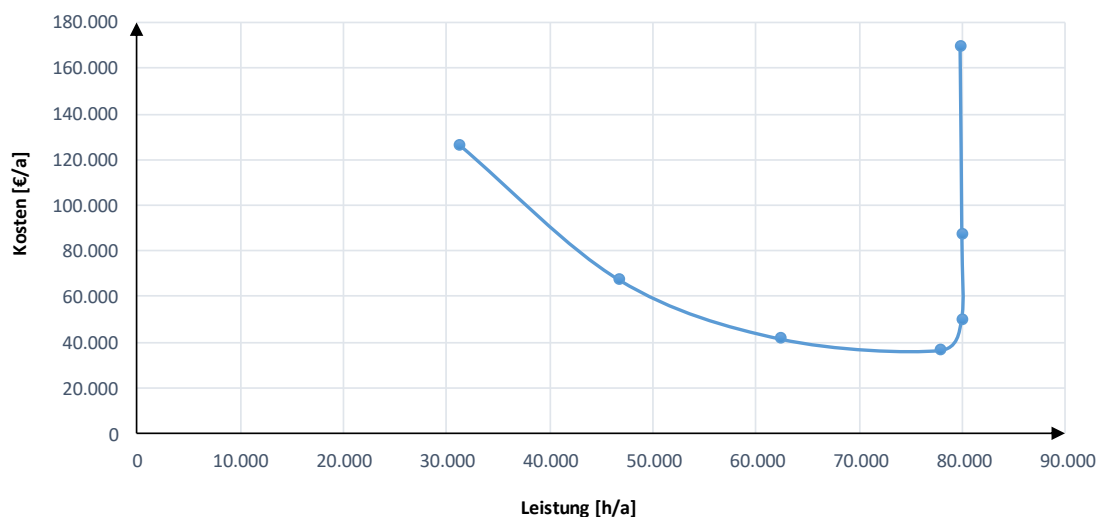


Abbildung 6-20: Exemplarisches Kosten-Leistungs-Verhältnis bei unterschiedlicher Systemlast

6.4 Zusammenfassung zum Regelkreis der Strukturbeurteilung

In diesem Abschnitt erfolgt die Zusammenführung der einzelnen methodischen Ansätze zu einem iterativen Vorgehen für die Beurteilung von Produktionsstrukturen (Abbildung 6-21), das letztlich ermöglicht, adäquate Maßnahmen auf Basis der durchgeführten Bewertungssystematik auszuwählen.

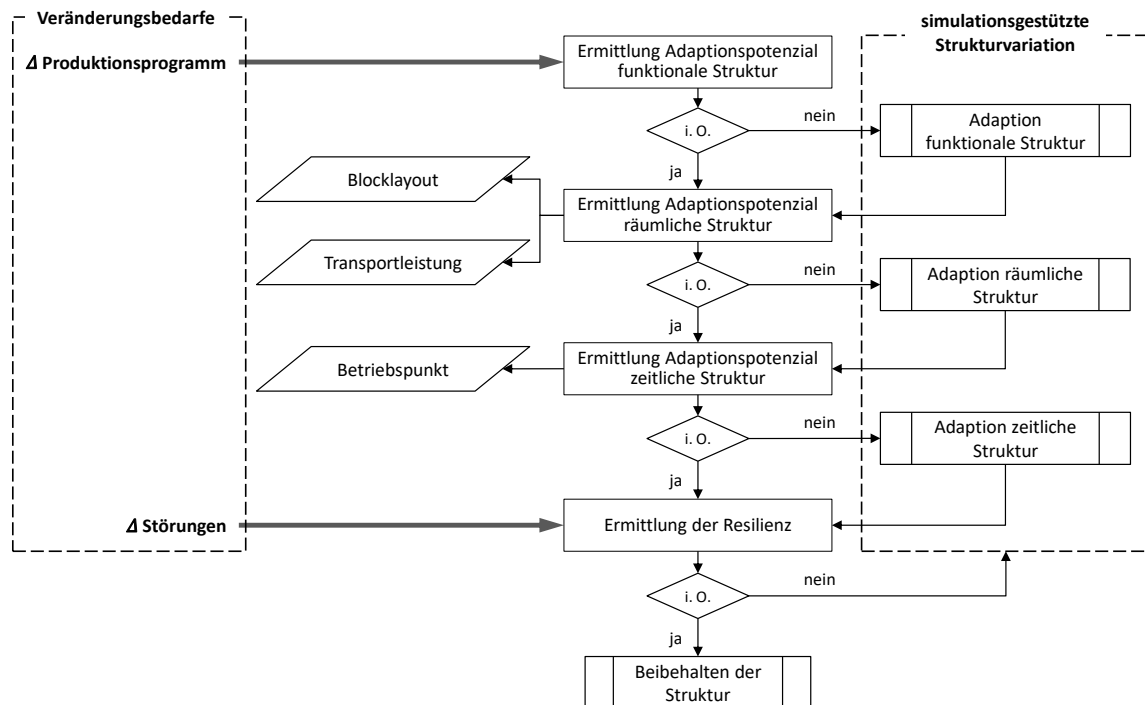


Abbildung 6-21: Iteratives Vorgehen zur Strukturbeurteilung

Die Strukturregelung umfasst eine generische Vorgehensweise zum einen zur Überprüfung der Eignung einer bestehenden Konfiguration, d. h. der gesamten betrachteten organisatorischen Leistungseinheit, bei sich änderndem Produktionsprogramm, und zum anderen zur Beurteilung der Resilienz der vorhandenen Produktionsstruktur für den Fall, dass es auf Grund einer Produktionsprogrammänderung zur strukturellen Rekonfiguration des Systems kommt oder dass sich die grundsätzlichen Störszenarien verschieben. Somit soll ein umfassender Überblick über das komplexe Systemverhalten geschaffen werden, der es im Sinne der Selbstregulation der Organisationseinheit ermöglicht, auf Grundlage der Bewertungsergebnisse die Notwendigkeit und Angemessenheit von Strukturadaptionen zu ermitteln.

Als Auslöser bzw. Anstoß der Methode wirkt entweder eine Änderung der Variabilitätsanforderungen, die durchaus auch prospektiv einer Zukunftsprognose entspringen kann, oder ein erkennbarer Trend der Kennzahlenentwicklung bei der kontinuierlichen Überwachung des Systemverhaltens (vgl. Kapitel 5). Im ersten Schritt ist zu prüfen, welche Art der Veränderung sich (voraussichtlich) ereignet. Für den Fall, dass es sich um einen Wandel des Kundenbedarfs handelt, kommt es folglich zu einer Verschiebung des Produktionsprogramms. Die Intensität des Veränderungsimpulses in Form seiner Dauer und Stärke hat jeweils einen vorab definierten Grenzwert zu überschreiten, dessen Festlegung vor dem Hintergrund des Potenzials des Produktionssystems erfolgt.

Ist eine signifikante Änderung vorhanden oder sind divergente Tendenzen der einzelnen Indikatoren zu verzeichnen, muss zunächst die Eignung der bestehenden Struktur vor dem Hintergrund des geänderten Produktionsprogramms verifiziert werden. Dies erfordert eine Bewertung des spezifischen Veränderungspotenzials unter Anwendung des in Abschnitt 6.1 entwickelten Vorgehens. Ergebnis dessen

sind differenzierte Aussagen zur zielorientierten Passfähigkeit der Produktionsstruktur. Durch die parallele Erzeugung von Referenzwerten für die ideale räumliche (Transportleistung und Blocklayout) sowie zeitliche Struktur (idealer Betriebspunkt) existieren damit Ansatzpunkte zur Verbesserung der bestehenden Konfiguration des Produktionssystems. Die Suchrichtung für adäquate Maßnahmen der Strukturadaption geben eben jene Referenzwerte vor. So verdeutlicht das erstellte Blocklayout, inwiefern sich eine divergente Topologie empfiehlt. Als Indikator lässt die Transportleistung bereits die relative Vorteilhaftigkeit einer idealen räumlichen Konfiguration erkennen. Hinsichtlich des Systemverhaltens signalisieren die einzelnen Kenngrößen Durchlaufzeit, Bestand und Leistung, welches Potenzial zur zeitlichen Strukturadaption besteht. Vordergründig ist hierbei allerdings zunächst die Prüfung der Suffizienz der Systemzusammensetzung in Bezug auf das Sachziel, die Erfüllung des Produktionsprogramms im vorgegebenen Zeitraum.

Stellt sich die Ressourcenbasis als unzureichend heraus, veranlasst dies eine Umplanung der Konfiguration beginnend mit der Festlegung der funktionalen Struktur (Funktionsbestimmung bzw. Dimensionierung). Die Durchführung der Funktionsbestimmung ist nur dann angezeigt, wenn sich die produktspezifischen Anforderungen hinsichtlich der technisch-technologischen Merkmale ändern, da diese neuartige Ressourcenelemente erfordern können. Reicht der quantitative Kapazitätsbestand vor dem Hintergrund der veränderten Produktionsaufgabe nicht aus, ist die Zahl der technischen und personellen Potenzialfaktoren zu ermitteln.

Nach der Absicherung der Suffizienz der Systemzusammensetzung bedarf es im Fortgang der simulationsgestützten Untersuchung sowohl der bestehenden als auch der vorteilhafter wirkenden Produktionsstruktur (vgl. Abschnitt 6.2). Die Simulationsdurchläufe erfolgen unter sukzessiver Variation der Konfiguration der Systemstruktur, des Produktionsprogramms sowie voraussichtlicher Beeinträchtigungssituationen zur Ermittlung empirischer Ergebnisdaten für die jeweiligen Systemszenarien. Die Entscheidung über die jeweiligen Ausprägungen der Stellgrößen liegt bei den betrieblichen Akteuren. Methodische Unterstützung bei der systematischen Generierung von Systemszenarien bietet allerdings das Aufzeigen des Veränderungspotenzials und der Adaptionrichtung.

An die Eignungsbeurteilung schließt sich bei eingeschätzter Zweckmäßigkeit einer strukturellen Adaption des existierenden Produktionssystems die Überprüfung der Resilienz an (vgl. Abbildung 6-21). Ausgangspunkt ist die Annahme, dass auf Grund der Komplexität der Produktionsstruktur und der Nichtlinearität der Wechselwirkungen auch eine geringfügige Rekonfiguration zu signifikanten Änderungen der Resilienz führen kann. Abhängig davon, ob sich die störungsbasierten Variationsanforderungen des Systems ebenfalls geändert haben oder nicht, erfolgt die simulationsgestützte Beaufschlagung des umstrukturierten Produktionssystems entweder mit unveränderten Störszenarien oder eben mit modifizierten. Das Ergebnis der Untersuchung ist der Wert für die Resilienz, der nun anhand seiner relativen Veränderung oder seines absoluten Betrages den Ausschlag dafür gibt, ob eine erneute Adaptionsschleife zu durchlaufen ist. Hierbei gibt das Resilienzprofil, die Vulnerabilität sowie die ergänzenden Kennzahlen, Agilität und Robustheit, Aufschluss über die Art der zu ergreifenden Maßnahmen und folglich über etwaige Strukturanpassungen für die Entwicklung des nächsten Systemszenarios.

Eine störungsinduzierte Resilienzbeurteilung verlangt zusätzlich nach einer Absicherung der Effektivität des Systems. Diese kann vereinfacht über die Ermittlung der Gesamtleistungsverluste erfolgen. Sollten diese auf Grund der veränderten Störereignisse gemessen an der vorgegebenen Toleranz zu groß ausfallen, ist zunächst eine geeignete Produktionsstruktur zu ermitteln, bevor deren Resilienz bewertet wird.

Vor diesem Hintergrund erfolgt die iterative Überprüfung möglicher Strukturalternativen für definierte Leistungseinheiten. Ein vollständige Enumeration aller strukturellen Optionen erscheint nicht nur mit

Blick auf die praktische Anwendung unzuweckmäßig. Ausgehend von der Vorauswahl eines geeigneten Strukturtyps auf Basis des ermittelten Veränderungspotenzials erfolgt vielmehr die sukzessive Bewertung benachbarter Strukturlösungen auf Vorteilhaftigkeit. Dabei wird das iterative Verfahren solange fortgesetzt, bis keine Verbesserungen der Zielwerte mehr erreicht werden. Daraus resultiert ein szenariobasierter Entwicklungspfad für die schrittweise Adaption der Produktionsstruktur an sich ändernde Umfeldanforderungen. Die mehrdimensionale Betrachtung der strukturellen Konfiguration des Produktionssystems bei der Ermittlung des Veränderungspotenzials und die Kreativität des Planers bei der Lösungssuche verringern dabei die Gefahr, auf Grund von Pfadabhängigkeiten (vgl. [CORD13]) wesentliche Verbesserungspotenziale zu vernachlässigen.

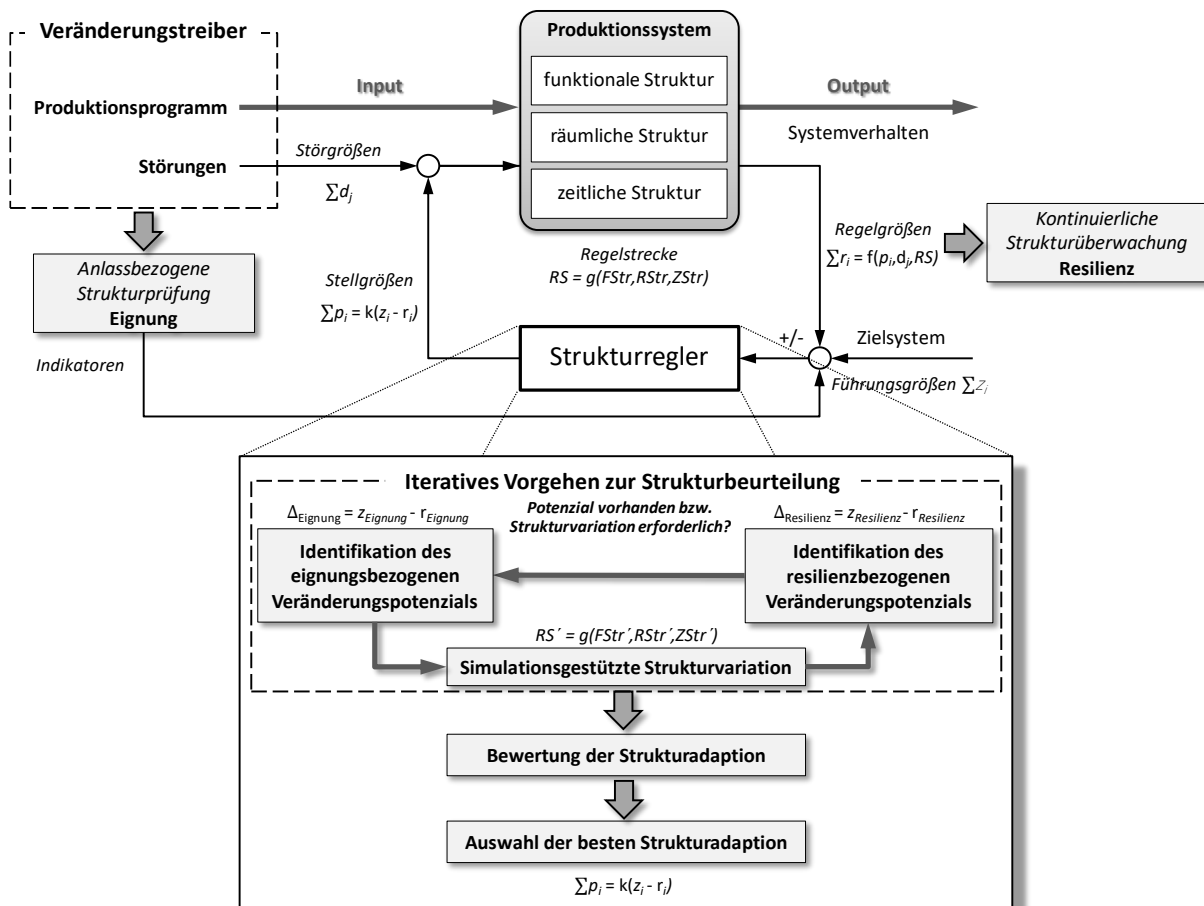


Abbildung 6-22: Regelkreis der Strukturbeurteilung

Anhand der gewonnenen Ergebnisdaten der einzelnen Simulationen wird anschließend die Wirtschaftlichkeit auf Grundlage der kostenseitigen Analyse der jeweiligen Potenzialinanspruchnahme ermittelt. Die ökonomische Bewertung der vorhandenen und der ggf. angepassten Strukturlösung ermöglicht unter Berücksichtigung etwaiger Adaptionsaufwände eine Aussage zur monetären Vorteilhaftigkeit (vgl. Abschnitt 6.3). Dazu wird der Aufwand struktureller Anpassungen mit dem resultierenden Nutzen ins Verhältnis gesetzt, um die beste Reaktion auf entstehende Veränderungsbedarfe auswählen zu können. Dieser Schritt schließt das iterative Vorgehen ab und vervollständigt letztlich den Regelkreis für die Beurteilung von Produktionsstrukturen (Abbildung 6-22).

Für die prospektive Beurteilung der Eignung von Produktionsstrukturen bedarf es ebenfalls einer simulationsgestützten Vorwegnahme potenzieller Belastungsszenarien. Dies beinhaltet eine Variation der Belastungstreuung und -höhe auf Basis des planerischen Vorgriffhorizontes in unterschiedlicher Granularität (langfristige Grobplanung bis kurzfristige Detailplanung).

Hinsichtlich der Resilienzbeurteilung kann prospektiv eine Simulation des Systemverhaltens bei unterschiedlichen Störereignissen eine Einschätzung dahingehend liefern, wie sich störungsbedingte Abweichungen in Kombination mit fluktuierenden Umwelteinflüssen auswirken. Dazu sind die Effekte variierender Einlastungen (Belastungsstreuungen) für verschiedene Störsituationen zu untersuchen. Nur so kann vorab die Auswirkung eines turbulenten Unternehmensumfeldes bei gleichzeitigem Auftreten innerbetrieblicher Störungen im Sinne des Resilienz-Begriffes ermittelt werden.

Eine vorherige Systemcharakterisierung ermöglicht die Identifikation von potenziellen Schwachstellen hinsichtlich der Anfälligkeit für Planabweichungen und kapazitiver Leistungsverluste. So stellen Engpässe auf Grund mangelnder Redundanz und Flexibilität stets Schwerpunkte der Betrachtung dar. Die systematische Vorwegnahme möglicher Störszenarien erhöht zum einen die Robustheit, da potenzielle Veränderungen prognostiziert werden (Antizipation) und durch vorbereitenden Maßnahmen eine Widerstandsfähigkeit gegenüber den vorhergesagten Ereignissen aufgebaut werden kann (Vorbereitung). Darüber hinaus unterstützt dieses Vorgehen durch die Sensibilisierung auf denkbare Entwicklungen die Agilität des Systems (Sichtbarkeit). Auf Grund der Simulation werden sowohl Effekte von Handlungsoptionen im Störfall hinsichtlich ihrer Wirksamkeit an sich als auch der Geschwindigkeit quantifiziert, was wiederum die Ableitung einer Prioritätsliste durchzuführender Eingriffe ermöglicht (Geschwindigkeit). Vor diesem Hintergrund ist eine Kombinatorik typischer Arten der Kundennachfrage mit definierten Störungsfällen in ihrer Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit zu analysieren, um so die Resilienz des betrachteten Produktionssystems beurteilen zu können. Bei der Untersuchung der Effekte stehen die Dauer der Funktionsbeeinträchtigung, das Niveau des verbleibenden Leistungsvermögens sowie der Grad und die Geschwindigkeit der Erholung des Systems im Fokus.

7 Anwendung der Methodik in der Praxis

In diesem Kapitel soll die entwickelte Methodik einem exemplarischen Funktionsnachweis am Fallbeispiel unterzogen werden. Dabei erfolgt die Untersuchung unterschiedlicher Szenarien hinsichtlich einer prototypischen Veränderung der Fluktuation und Variation, um auf Basis möglicher Strukturalternativen die Beurteilungssystematik in ihrem Aussagegehalt und Mehrwert für die betriebliche Anwendung zu verifizieren.

7.1 Beschreibung des Ausgangszustandes

Ausgangspunkt ist eine idealtypische variantenreiche Serienfertigung, die unterschiedliche Erzeugnisse in einem mehrstufigen Prozess herstellt. Ein Simulationsmodell des Produktionssystems dient im Fortgang als Untersuchungsgegenstand, um verschiedenste Systemszenarien abbilden zu können.

Die betrachtete Werkstatt besteht aus neun unterschiedlichen Betriebsmittelarten bzw. Technologien, wobei es je Typ mitunter mehrere gleichartige Maschinen gibt. Nachfolgend sind die relevanten Grunddaten des Produktionssystems aufgelistet:

- Organisationstyp: Werkstatt
- Anzahl unterschiedlicher Betriebsmittelarten: 9
- Anzahl Betriebsmittel: 28
- Anzahl Arbeitstage pro Jahr [BKT]: 250
- Anzahl Schichten pro Tag: 2
- Schichtlänge [h/s]: 8
- Jahreszeitfond [h]: 4.000
- Simulationszeit [h]: 12.000 (3 Jahre)

Die verschiedenen Produkte weisen jeweils unterschiedliche Losanzahlen und -größen, Rüst- und Bearbeitungszeiten je Betriebsmittel sowie Arbeitsfolgen auf. Der Jahreszeitfond für das Produktionssystem beträgt 4.000 Stunden, was einem Jahr mit 250 Arbeitstagen und einem 2-Schicht-Betrieb entspricht. Für die Simulation wurden jedoch 3 Jahre also 12.000 Stunden verwendet, um eine gegebene Einschwing- und Ausschwingzeit des Systems auszugleichen und ein repräsentatives Systemverhalten abzubilden.

Gefertigt werden sechs unterschiedliche Bauteile. Der geforderte Jahresdurchsatz beträgt für vier Produkte 36.000 Stück und für zwei 60.000 Stück. Ein Großteil der Erzeugnisse des betrachteten Produktionssystems geht nachfolgend in einen Montageprozess ein. Einen Überblick über das Produktionsprogramm liefert Abbildung 7-1. Diese zeigt auch die gewählten Losgrößen sowie die Anzahl der Lose pro Jahr. Es ist zu beachten, dass der Härteprozess extern erfolgt und dabei auf Basis bestehender Lieferverträge mit einer Standard-Durchlaufzeit von 80 h geplant wird.

Das Produktionssystem wird über das ConWIP-Verfahren bestandsorientiert gesteuert.

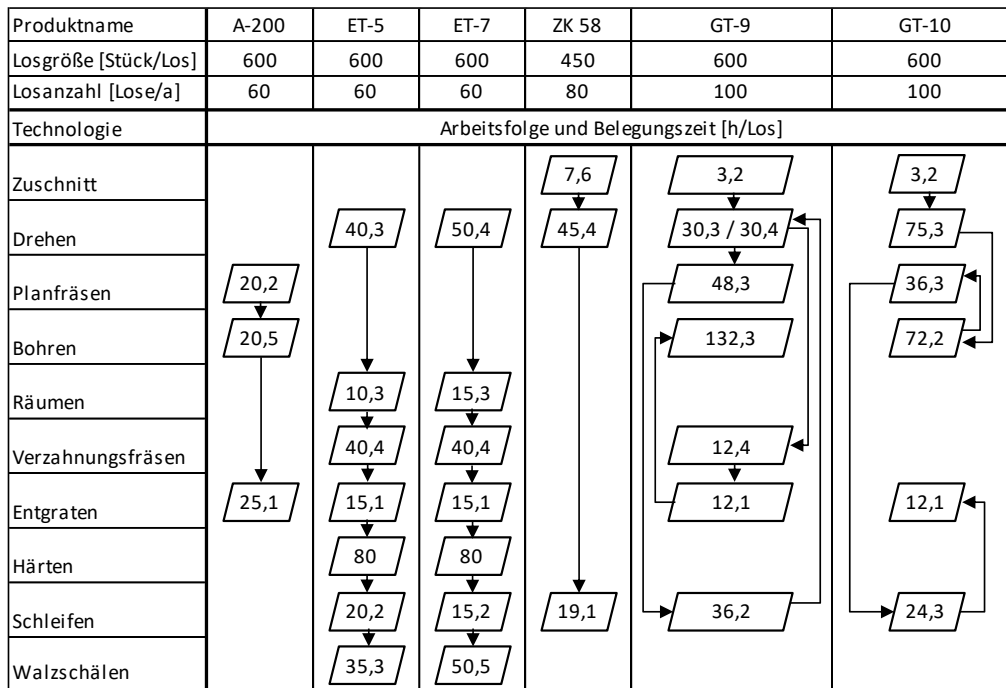


Abbildung 7-1: Arbeitsfolgen des Produktionsprogramms (t₀)

Der ursprüngliche Planungsstand mit den jeweiligen Auftragszeiten, Losgrößen und dem Schichtmodell sorgte für die realisierte Dimensionierung der technischen Ressourcen. Weiterhin wird die Mehrmaschinenbedienung ausgeschlossen, so dass die Nutzung jedes Arbeitsmittels genau eine Arbeitskraft erfordert. Das Ergebnis der vorangegangenen Dimensionierung zeigt Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Systemzusammensetzung und Kapazitäten

Technologie	Anzahl	Schichten/BKT	Kapazität [h/BKT-BM]	Kapazität [h/BKT]
Zuschnitt	1	1	8	8
Planfräsen	3	2	16	48
Drehen	7	2	16	112
Räumen	1	1	8	8
Verzahnungsfräsen	2	2	16	32
Bohren	7	2	16	112
Schleifen	3	2	16	48
Entgraten	2	2	16	32
Walzschälen	2	2	16	32
Summe	28	16	128	432

Zunächst werden auf Basis der vorliegenden Informationen des Produktionssystems die relevanten Strukturindikatoren berechnet.

Für die funktionale Struktur ergibt sich ein Vielfaltsindex von 5, da sich die Produkte ET-5 und ET-7 zu einer Ablauffamilie zusammenfassen lassen. Der Mengenindex, d. h. die mittlere Losgröße, beträgt 690 Stück, sofern nun fünf Basiserzeugnisse zugrunde gelegt werden.

Ausgangssystem Intensitäten [Lose/a]	Wareneingang	Zuschnitt	Drehen	Planfräsen	Bohren	Räumen	Verzahnungsfräsen	Entgraten	Schleifen	Walzschälen	Warenausgang
Wareneingang	280	120	60						120		
Zuschnitt		280									
Drehen			100	100	120	100		80			
Planfräsen						60		200			
Bohren			100				60				100
Räumen						120					
Verzahnungsfräsen							220				
Entgraten				100							280
Schleifen		100					100	120	80		
Walzschälen										120	
Warenausgang											

Abbildung 7-2: Materialflussmatrix des Produktionsprogramms (t_0)

Die Materialflussmatrix des Systems lässt die bestehenden Rückflüsse erkennen (Abbildung 7-2). Auf dieser Basis ergeben sich der Verflechtungsgrad sowie der Vektorgrad wie folgt:

$$X = \frac{\kappa(n, m) - \kappa_{RS,u}(m)}{\kappa_{RS,o}(m) - \kappa_{RS,u}(m)}, \text{ wobei } \kappa_{RS,o}(11) = 4 - \frac{6}{11} = 3,45 \text{ und } \kappa_{RS,u}(11) = 2 - \frac{2}{11} = 1,81 \text{ betragen.}$$

Somit ergibt sich für $X = \frac{24 \cdot 2/11 - 1,81}{3,45 - 1,81} = 1,55 > 1$. Dies spricht für die etablierte Netzstruktur.

Für den Vektorgrad P ergibt sich ein Wert von $\frac{TI_r - TI_e}{TI_r + TI_e} = \frac{2720 - 400}{2720 + 400} = 0,74 < 1$. Hier schlagen sich die Rückflüsse und rekursiven Transportschleifen deutlich nieder.

Für die zeitliche Struktur beträgt die mittlere systemische Belastung M rund 2.610,4 h/a bei einem Variationskoeffizienten von 98%. Für den späteren Vergleich sind nachfolgend die Kenngrößen der Ablaufstruktur mit ihren mittleren Werten aufgeführt:

- Bestand: 6.434,6 h,
- Leistung: 338,3 h/BKT und
- Durchlaufzeit: 17,4 BKT.

7.2 Variation des Belastungsszenarios

Die Variation des Belastungsszenarios dient der Verdeutlichung der Funktionsweise der ereignisorientierten Identifikation von Veränderungsbedarfen sowie der anschließenden Ermittlung des Strukturpotenzials.

Ausgehend von der bestehenden Produktionsstruktur kommt es im Zeitverlauf (Zeitpunkt t_1) zu einem Wandel der Kundennachfrage, der sich direkt im Produktionsprogramm niederschlägt und durch die anlassbezogene Strukturüberprüfung erkannt wird. Das geänderte Produktionsprogramm veranschaulicht Abbildung 7-3.

Produktname	A-200	ET-5	ET-7	ZK 58	A-100	3x-T	ZK 54	ET-6
Losgröße [Stück/Los]	600	600	600	450	225	375	600	600
Losanzahl [Lose/a]	60	60	60	80	160	96	60	60
Technologie	Arbeitsfolge und Belegungszeit [h/Los]							
Zuschnitt				7,6			5,2	
Drehen		40,3	50,4	45,4		62,9	50,4	50,4
Planfräsen	20,2				22,8	25,3		
Bohren	20,5				120,5			
Räumen		10,3	15,3					
Verzahnungsfräsen		40,4	40,4					20,4
Entgraten	25,1	15,1	15,1		9,5			15,1
Härten		80	80					80
Schleifen		20,2	15,2	19,1			40,2	20,3
Walzschälen		35,3	50,5					

Abbildung 7-3: Arbeitsfolgen des Produktionsprogramms (t₁)

Zwei Produkte entfallen (GT-9 und GT-10), da sie das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben. Stattdessen bereichern nun die Erzeugnisse A-100, 3x-T, ZK 54 sowie ET-6 das Portfolio. Die resultierenden Veränderungen der Materialflussmatrix veranschaulicht Abbildung 7-4.

Belastungsszenario Intensitäten [Lose/a]	Arbeitsfolge										
	Wareneingang	Zuschnitt	Drehen	Planfräsen	Bohren	Räumen	Verzahnungsfräsen	Entgraten	Schleifen	Walzschälen	Warenausgang
Wareneingang	200	216	220						180		
Zuschnitt		200									
Drehen			96		120	60		140			
Planfräsen				220							96
Bohren						220					
Räumen						120					
Verzahnungsfräsen							180				
Entgraten											220
Schleifen									120	200	
Walzschälen											120
Warenausgang											

Abbildung 7-4: Materialflussmatrix des Produktionsprogramms (t₁)

Auf dieser Basis lassen sich nun wiederum die Indikatoren für den Veränderungsbedarf ermitteln. Für den Verflechtungsgrad X ändern sich die Grenzwerte für $\kappa_{RS,o}$ und $\kappa_{RS,u}$ nicht, da die Anzahl der Arbeitsmittel und damit die Ressourcenbasis unverändert bleiben.

Somit ergibt sich für $X = \frac{18 \cdot 2/11 - 1,81}{3,45 - 1,81} = 0,89 < 1$. Hieraus lässt sich folglich der Trend hin zu einer Reihenstruktur erkennen. Der Vektorgrad P ergibt sich zu $\frac{T_{I_r} - T_{I_e}}{T_{I_r} + T_{I_e}} = \frac{3108 - 0}{3108 + 0} = 1$ und weist somit eine ideale linienförmige Topografie ohne Rückflüsse auf. Insgesamt lässt sich somit eine Reduktion der Materialflusskomplexität konstatieren.

Für die zeitliche Struktur beträgt die mittlere systemische Belastung M rund 2.532,5 h/a und bleibt damit annähernd auf dem vorherigen Niveau. Der Variationskoeffizient erhöht sich jedoch auf 132%.

Hinsichtlich der funktionalen Struktur ist ein divergenter Trend erkennbar. Auf der einen Seite erhöht sich nominell die Produktanzahl von sechs auf acht. Auf der anderen Seite lassen sich die Produkte A-100 und A-200, ET-5 bis ET-7 sowie ZK 58 und ZK 54 jeweils zu Teilefamilien zusammenfassen, da ihre Fertigungsabläufe sich stark ähneln und auch die arbeitssystemische Belastung vergleichbar ist. Weiterhin erscheint somit eine Abgrenzung heterogener Leistungseinheiten möglich, was jeweils zu einer merklichen Senkung des Variationskoeffizienten der zeitlichen Struktur für die neugebildeten Produktionssysteme führt.

Insofern ist eine vertiefende Prüfung der strukturellen Ausprägungen einhergehend mit einer Ermittlung des Veränderungspotenzials angezeigt. Auf Grund der besseren Vergleichbarkeit der Effekte wird die funktionale Struktur und somit das inhärente Potenzial des Produktionssystems beibehalten.

Daher ist im ersten Schritt die räumliche Strukturdimension zu betrachten. Für die Ermittlung des Potenzials der Aufbaustruktur wird die bestehende Fertigungstopologie in ein flächenmaßstäbliches Blocklayout überführt. Das Ergebnis veranschaulicht Abbildung 7-5 (links). Die unterschiedlichen Flächen signalisieren die jeweiligen Technologiepools der Arbeitsmittel. Die dazugehörige Transportleistung beträgt $59.023 \text{ Lose} \cdot \text{m/a}$.

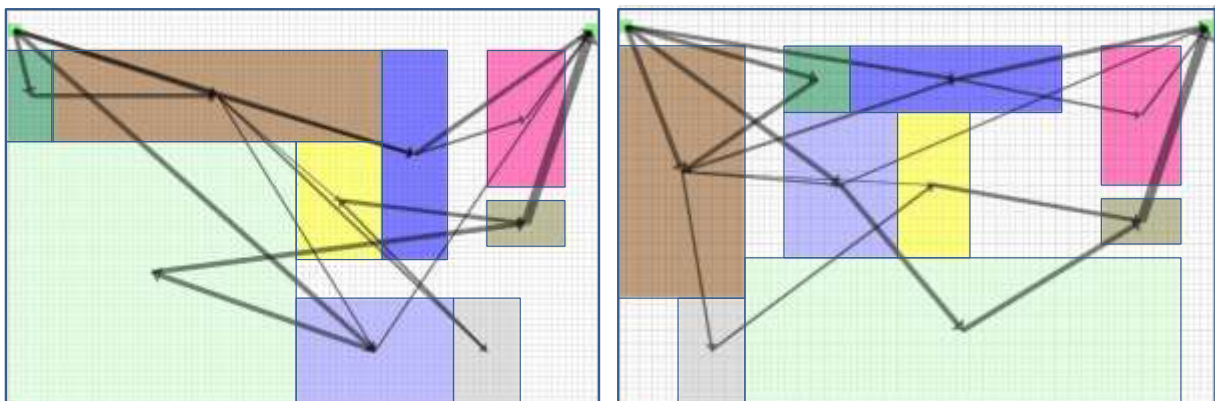


Abbildung 7-5: Blocklayouts (links: bisheriger Zustand, rechts: neue Anordnung)

Unter Anwendung des modifizierten Dreieckverfahren nach Schmigalla und dem Vertauschungsverfahren nach Pack (vgl. [GRUN12], [AGGT90]) lässt sich ein verbessertes Blocklayout finden, welches in Abbildung 7-5 rechts dargestellt ist, wobei sowohl Warenein- als auch -ausgang an gleicher Stelle verbleiben. Die Transportleistung kann infolge der veränderten Anordnung auf $51.809 \text{ Lose} \cdot \text{m/a}$ verringert werden. Die jeweiligen Entfernungsmatrizen finden sich im Anhang D. Demzufolge ergibt sich ein Potenzial der räumlichen Struktur von knapp 14%. Dabei ist zu beachten, dass die bestehende Grundfläche der bisherigen Leistungseinheit beibehalten wurde.

Nachfolgend bedarf die geänderte Aufbaustruktur einer Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf die zeitliche Strukturdimension und das resultierenden Veränderungspotenzial. Dazu werden zunächst

das etablierte Steuerungsverfahren auf die geänderte Topologie angewandt und mittels Simulation Ergebnisdaten des Systemverhaltens erzeugt.

Bei ansonsten unveränderter Konstellation ergeben sich für die Kenngrößen der Ablaufstruktur folgende Werte:

- Bestand: 4.390,8 h,
- Leistung: 313,2 h/BKT und
- Durchlaufzeit: 12,1 BKT.

Auf Basis der vorhandenen Systemzusammensetzung lässt sich nun das Potenzial ermitteln (Anhang E). Für den Mindestbestand ergibt sich ein Wert von 4.196,6 h, bei einer Durchlaufzeit von 8,85 BKT und einer produktionsprogramminduzierten maximalen Leistung von 338,1 h/BKT. Bei gleichwertiger Wichtung aller drei Kenngrößen ergibt sich ein Verbesserungspotenzial für die Durchlaufzeit von knapp 37% und für die Leistung von 7,4%. Der aktuelle Bestand ist derzeit größer als der ausgewiesene Mindestbestand. Dennoch zeigt sich in Verbindung mit den Leistungsdaten, dass das Produktionssystem noch nicht voll ausgelastet ist. Beim Vergleich mit dem Kapazitätsbestand von 432 h/BKT beträgt das Potenzial sogar 27,5%.

Mit Blick auf die Ergebnisdaten des Produktionssystems vor der Änderung des Produktionsprogramms und mit Netzstruktur sind mit Ausnahme der Leistung (313 anstatt 338 h/BKT) bereits klare Verbesserungen der Zielgrößen (Bestandssenkung von 6.435 auf 4.391 h und Durchlaufzeitreduktion von 17 auf 12 BKT) zu verzeichnen.

Da bislang lediglich stochastische Kurzzeitstörungen auftreten, erübrigt sich zunächst die Resilienzbeurteilung.

7.3 Variation des Beanspruchungsszenarios

Im Fortgang ändert sich die Störsituation des Produktionssystems dahingehend, dass der Fremdfertiger, der den externen Härteprozess übernimmt, infolge einer eigenen Überlastung einen Lieferengpass wärmebehandelter Teile verursacht. Dies betrifft nur drei Produkte (ET-5 bis ET-7).

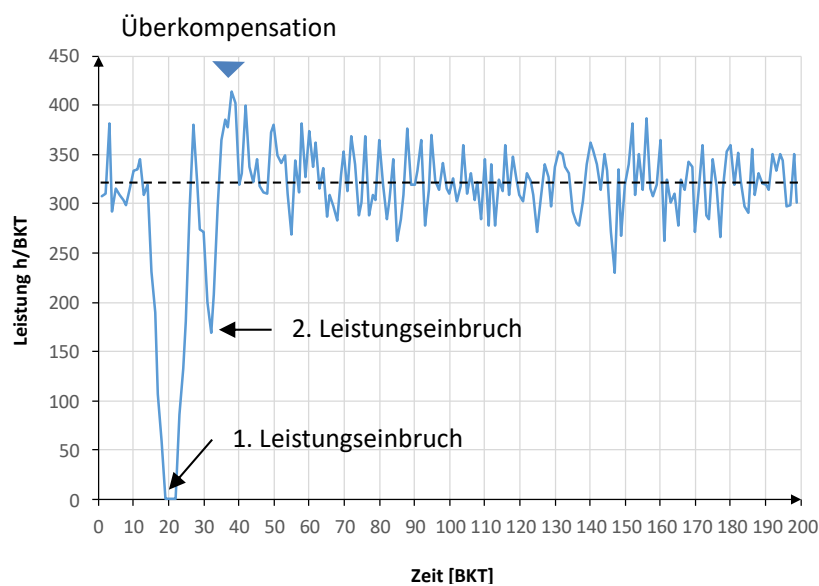


Abbildung 7-6: Leistungsverlauf bei Ausfall des Externen

Um die Wirkungsweise der kontinuierlichen Strukturüberwachung anhand des Systemverhaltens zu verdeutlichen, wird eine reaktive Beurteilung der Resilienz bei Eintreten des erwähnten Lieferengpasses vorgenommen. Abbildung 7-6 zeigt den resultierenden Verlauf der Leistungskennwerte über die Zeit. Die gestrichelte Linie stellt den Mittelwert der Leistung im ungestörten Systemzustand dar ($L = 313,2 \text{ h/BKT}$).

Drei Wochen nach Beginn der Aufzeichnungen fällt der Zulieferer für den externen Härteprozess für die Dauer von 2 Wochen aus. Der vollständige Leistungseinbruch ist klar ersichtlich. Insofern weist die vorliegende Konfiguration gegenüber dieser Art von Störung keinerlei Robustheit auf.

Zudem wird deutlich, dass es nach einer kurzen Erholungsphase einen zweiten Abfall gibt. Dieser resultiert nach Abbau der internen Bestände aus dem Leerlauf der nachfolgenden Technologien. Die Leistungsspitze 5 Wochen nach dem Ausfall des Externen stellt eine Art Überkompensation dar, die das Potenzial der Produktionsstruktur nahezu vollständig ausreizt, indem währenddessen kurzzeitig $414,7 \text{ h/BKT}$ abgearbeitet werden. Ursache hierfür ist das Auffüllen der internen Puffer vor dem Härteprozess im Zeitraum der Beeinträchtigung und einem schlagartigen Abbau dieser Arbeitsvorräte nach der Störungsbehebung.

Die Sensitivität der Struktur beim vollständigen Einbruch der Leistung beträgt $\frac{313,2 \text{ h}}{6 \text{ BKT}} = 52,2 \text{ h/BKT}$, d. h. mit dieser Geschwindigkeit fällt die Funktionserfüllung bis auf null ab. Da die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit in 17 BKT realisiert wird und zusätzlich noch eine Überkompensation stattfindet, ergibt sich eine Agilität von $\frac{414,7 \text{ h}}{17 \text{ BKT}} = 24,4 \text{ h/BKT}$, was nicht einmal der Hälfte der Sensitivität entspricht. Daher ist das System diesbezüglich als eher träge zu bezeichnen. Aus der isolierten Betrachtung der ersten Leistungserholung resultiert auf Grund des symmetrischen Kurvenverlaufs jedoch ein Wert von $52,2 \text{ h/BKT}$ für die Agilität (analog zur Sensitivität).

Um künftig sowohl agiler im Störfall zum ursprünglichen Leistungsniveau zurückzukehren als auch eine gewisse Robustheit gegenüber dieser Form der Beeinträchtigung aufzuweisen, erscheint neben der Suche alternativer Lieferanten die Reduktion der Losgröße zweckmäßig.

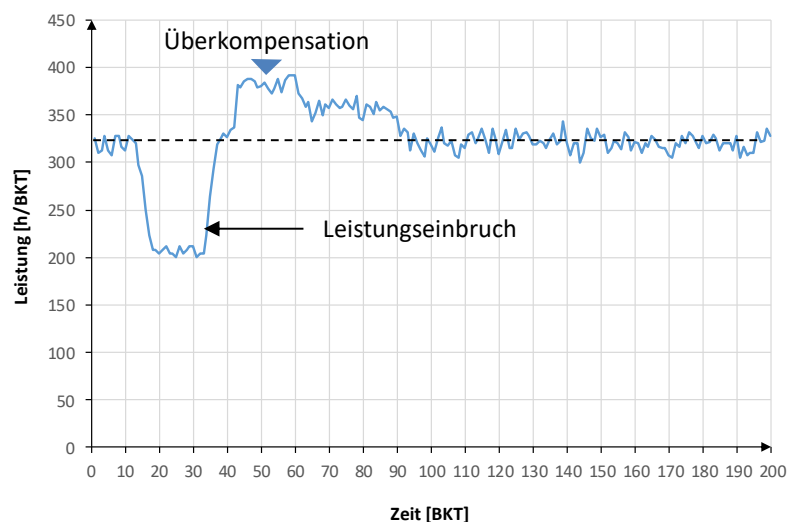


Abbildung 7-7: Leistungskurve bei verringerter Losgröße

Im Rahmen der systematischen Strukturvariation erfolgt im Fortgang die simulationsgestützte Vorwegnahme des Systemverhaltens bei gleichem Störszenario aber verringerter Auflagenhöhe. Die Losgröße der einzelnen Produkte wird dazu sukzessive verkleinert. Exemplarisch soll an dieser Stelle der Simulationsdurchlauf bei 25% der ursprünglichen Losgrößen betrachtet werden.

Insgesamt ist ein geglätteter Leistungsverlauf bei verringerter Losgröße zu erkennen (Abbildung 7-7). Zudem wird offensichtlich, dass der totale Leistungseinbruch durch die vorweggenommene Maßnahme verhindert werden kann. Zwar sind dennoch merkliche Einbußen der Funktionsfähigkeit zu verzeichnen (Reduktion auf ca. 200 h/BKT), allerdings stellt dies bereits eine eindeutige Verbesserung zur vorherigen Situation dar. Der Robustheitsgrad beträgt demzufolge $\frac{199,8 \text{ h/BKT}}{313,2 \text{ h/BKT}} = 63,8\%$.

Für die Sensitivität ergibt sich ein Wert von $\frac{313,2 \text{ h} - 199,8 \text{ h}}{4 \text{ BKT}} = 28,4 \text{ h/BKT}$, was einer Verringerung von knapp 50% entspricht. Die Agilität weist den gleichen Betrag auf und konnte somit leicht von 24,4 auf 28,4 h/BKT erhöht werden. Wird nun noch die Überkompensation berücksichtigt, ergibt sich lediglich ein Wert von $\frac{386,1 \text{ h} - 199,8 \text{ h}}{12 \text{ BKT}} = 15,2 \text{ h/BKT}$. Dies spricht dafür, dass der Bereich der kurzzeitigen Steigerung über das durchschnittliche Maß hinaus einer gesonderten Betrachtung bedarf. Insofern ist davon auszugehen, dass sich Agilität und Sensitivität strukturbedingt symmetrisch verhalten.

Bei Untersuchung der Resilienz der beiden Systemszenarien fällt auf (Anhang F), dass die Leistungsfähigkeit trotz gleichartiger Störsituation bei der ursprünglichen zeitlichen Struktur mit 4-facher Losgröße gegenüber dem angepassten System mit 77.544,3 h/a geringer ausfällt als das Strukturkonzept mit verringerter Losgröße (79.898,1 h/a). Dies untermauert die Vorteilhaftigkeit der Strukturadaptation. Dementsprechend fördern kleinere Losgrößen Agilität und Robustheit gleichermaßen.

7.4 Resilienzorientierte Bewertung exemplarischer Strukturkonzepte

Als letzten Schritt des Funktionsnachweises erfolgt die Ermittlung des resilienzorientierten Kosten-Leistung-Verhältnisses für zwei ausgewählte Strukturkonzepte im direkten Vergleich, d. h. für den jeweiligen Strukturbetrieb.

Zunächst soll die Konfiguration mit ursprünglicher Losgröße monetär bewertet werden. Dazu sind vordergründig die Zeitaufwände der im Abschnitt 6.3 definierten Aktivitäten zu ermitteln. Dabei ist festzuhalten, dass im Simulationsmodell die Transporte keinen zeitlichen Aufwand verursachen. Deshalb wird stattdessen die Anzahl der Materialflussbewegungen herangezogen (Abbildung 7-4). Somit sind nur noch die Nutzungsdauern der Arbeitsmittel, die Leerzeiten sowie die Lagerdauer und Steuerungsaufwände zu differenzieren.

Bei Kenntnis der Belegungszeiten, die durch die Arbeitspläne vorliegen, können anhand der Durchlaufzeiten die störungsbedingten unproduktiven Zeiten errechnet werden. Die Berechnungen beruhen auf einer produktspezifischen Differenzierung der zeitlichen Inanspruchnahme der einzelnen Potenzialfaktoren. Die jeweiligen Kostensätze gleichen sich bei beiden Strukturkonzepten. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden nachfolgend die summarischen Ergebniswerte angegeben. Die detaillierten Berechnungen finden sich im Anhang G.

Von den 12,1 BKT Durchlaufzeit sind im Mittel ca. 9,19 BKT als produktiv anzusehen. Der Rest entfällt auf Leerzeiten. Nach monetärer Bewertung ihres störungsbedingten Anteils betragen die Kosten daraus 13.515,4 €/a. Auf Basis der produktspezifischen Losanzahl ergeben sich Rüstkosten in Höhe von 3.574,81 € für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr. Die Kosten der Potenzialinanspruchnahme belaufen sich auf 373.890,59 €. Lagerhaltungskosten sowie Transportkosten für diesen Zeitraum fallen in Höhe von 20.292,19 € bzw. 732,- € an. Hinsichtlich der Transportaufwände wird für die insgesamt nötigen 976 Materialbewegungen ein Kostensatz von 0,75 € veranschlagt. Unter Beachtung des Gesamtleistungswertes, der sich für diesen Zeitraum ergibt, beträgt das Verhältnis aus Leistung zu den anfallenden Kosten: $\frac{77.544,3 \text{ h}}{412.004,99 \text{ €}} = 0,188 \text{ h/€}$ bzw. 188,2 h/T€.

Bei Verringerung der Losgröße verändern sich die Kostengrößen entsprechend Tabelle 7-2.

Tabelle 7-2: Kostenvergleich der Systemszeanrien

Kostenbestandteile	Ursprüngliche Losgröße	¼ Losgröße
Bearbeitungskosten	373.890,59 €	373.097,27 €
Rüstkosten	3.574,81 €	14.264,38 €
Transportkosten	732,00 €	2928,00 €
Lagerkosten	20.292,19 €	16.754,68 €
Leerkosten	13.515,40 €	8.458,63 €
Summe	412.004,99 €	415.502,96 €

Damit ergibt sich für die verringerte Auflagenhöhe bei einer Gesamtleistung von 79.898,1 h/a ein Koeffizient von: $\frac{79.898,1 \text{ h}}{415.502,96 \text{ €}} = 0,192 \text{ h/€}$ bzw. 192,3 h/T€.

Somit ist die Adaption der zeitlichen Struktur in Form der Verringerung der Losgröße für das geänderte Belastungsszenario (Abschnitt 7.2) angesichts der Beanspruchungssituation (Abschnitt 7.3) im Sinne des Fortbestehens des Unternehmens, also unter Berücksichtigung von Resilienz und Wirtschaftlichkeit, zu empfehlen. Diese Entscheidung begründet sich zum einen aus der Suffizienz der Produktionsstruktur an sich für die anstehende Produktionsaufgabe und zum anderen anhand des besseren Kosten-Leistung-Verhältnisses.

Damit lässt sich konstatieren, dass die entwickelte Bewertungssystematik eine belastbare Aussage zur resilienzorientierten Vorteilhaftigkeit sowohl von unterschiedlichen Konfigurationen von Produktionssystemen als auch für die Auswahl von Adaptionen treffen kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schlussbetrachtung umfasst ein Fazit und bietet darüber hinaus einen Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten im Bereich der Strukturbeurteilung sowie der Operationalisierung von Resilienz im betriebsorganisatorischen Kontext.

Ausgangspunkt der Betrachtungen stellte der permanente Zwang für Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung dar, auf Grund ihrer produktionssystemischen Charakteristik sensitiv auf Veränderungen der Kundennachfrage zu reagieren. Dieser Effekt wird durch die turbulenten Umfeldbedingungen zusätzlich verstärkt. Die resultierenden Variationen des Produktionsprogramms sowie interner Störfaktoren bewirken eine Komplexität des Leistungserstellungsprozesses, die in einem nichtlinearen Systemverhalten mündet. Dies erschwert es derartigen Betrieben, die passende Balance zwischen effizienter Produktion und Anpassungsfähigkeit gegenüber Änderungsimpulsen zu finden, so dass das turbulente Umfeld die bestehenden Produktionsstrukturen permanent in Frage stellt.

Vor diesem Hintergrund zielte die vorliegende Arbeit darauf ab, die betrieblichen Akteure methodisch dahingehend zu unterstützen, dass Veränderungsbedarfe frühzeitig erkannt und geeignete Adaptionsmaßnahmen zuverlässig identifiziert werden können. Zu diesem Zweck wurden zunächst die notwendigen systemtheoretischen Grundlagen unter Berücksichtigung der Dichotomie der Strukturgestaltung und des anschließenden Betriebs derselben systematisiert, um ein einheitliches Verständnis der Thematik sicherzustellen. Darauf aufbauend erfolgte die Untersuchung der Auslöser für notwendige Anpassungsmaßnahmen und gängiger Konzepte in diesem Bereich. Daraus konnte der Handlungsbedarf für den praktischen Umgang mit den beschriebenen Phänomenen abgeleitet werden.

Im nächsten Schritt wurden bestehende wissenschaftliche Ansätze zur Strukturbewertung aufgearbeitet und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit geprüft. Insbesondere die phasenbezogen differenzierte Betrachtung von Aufbau- und Ablaufstruktur ist diesbezüglich als auffällig zu bezeichnen. Dennoch bleibt zu konstatieren, dass durchaus zahlreiche Kennzahlen zur Bewertung unterschiedlicher Struktur Aspekte bestehen. Allerdings fehlt ihnen ein gemeinsamer Kontext, der sie im Sinne einer einheitlichen Bewertungsgrundlage verbindet. Insofern bieten die Ansätze zur Einschätzung der Veränderungsfähigkeit kein durchgängiges Methodenwerk. Auf Grund der vielfältigen Begriffsdefinitionen und der teils divergenten Untersuchungsziele mangelt es noch an einer Objektivierung der Beurteilungsmechanismen und explizit an einer Quantifizierung der Resilienz im betriebsorganisatorischen Kontext.

Deswegen wurde auf Basis der ermittelten Defizite bestehender Ansätze ein Forschungsbedarf identifiziert, aus dem die Anforderungen an die nachfolgend entwickelte Vorgehensweise abgeleitet wurden. Den wissenschaftlichen Kern der Arbeit stellt die Konzeption einer Systematik zur resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen dar. In diesem Zusammenhang erfolgte die Aufstellung eines Kennzahlensystems, das einerseits der notwendigen Passfähigkeit einer Produktionsstruktur mit Blick auf ein zu bewältigendes Produktionsprogramm über eine indikatorbasierte Identifizierung des Veränderungsbedarfs Rechnung trägt. Andererseits wurde die leistungsorientierte Resilienz von Produktionssystemen anhand objektiver Kenngrößen operationalisiert.

Im Fortgang erfolgte die Entwicklung einer durchgehenden Methode zur iterativen Beurteilung von Strukturkonzepten, die ausgehend vom identifizierten Veränderungsbedarf das Potenzial von Strukturadaptation erkennen lässt. Mittels simulationsgestützter Generierung von Systemszenarien, die bestimmte Konfigurationsalternativen mit unterschiedlichen Belastungssituationen und subsumierten Störzuständen beaufschlagen, werden sukzessive vorteilhaft erscheinende Produktionsstrukturen geprüft. Dazu wurden Hinweise für die Erstellung eines systematischen Versuchsplans zur Strukturvariation gegeben. Die anschließende Bewertung der simulierten Produktionsstrukturen erfolgt in Bezug auf die wirtschaftliche Effizienz in Form der Gesamtkosten einer Strukturlösung unter Beachtung der

leistungsorientierten Resilienz. Zu diesem Zweck wurde vorab Transparenz hinsichtlich der strukturabhängigen Kostenbestandteile geschaffen. Aus dem Vergleich alternativer Strukturkonzepte lässt sich anhand des vorgestellten Kosten-Leistung-Verhältnisses die beste Konfiguration bei Berücksichtigung etwaiger Adaptionsaufwände auswählen.

Abschließend wurde daraus ein generisches Vorgehen für die Strukturregelung abgeleitet, dessen Funktionsfähigkeit an einem praktischen Anwendungsbeispiel prototypisch nachgewiesen werden konnte. Diese Bewertungsmethode bildet somit ein belastbares Fundament für eine Beurteilung der Eignung und Resilienz eines Produktionssystems der variantenreichen Serienfertigung sowie der Identifikation adäquater Strukturadaptationen unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit. Die systematische Variation der Variabilitätsparameter hinsichtlich der Belastung (turbulente Produktionsprogrammänderung) und der Eigenschaftsänderung (Störungen) verschiedener Strukturkonzepte über Simulationsmodelle führt zur Transparenz der ökonomischen Auswirkungen. Die proaktive Bewertung ermöglicht im Bedarfsfall eine schnelle und zielgerichtete Vorwegnahme der Anpassung von Produktionsstrukturen zur Absicherung einer resilienten und effizienten Produktion. Damit wurde das Ziel der Arbeit erreicht.

Ausblickend ergeben sich weitere Forschungsfelder, die an die vorliegende Arbeit anknüpfen. Zwar stellen die dynamischen Wechselwirkungen der komplexen Vernetzungen innerhalb realer Produktionssysteme weiterhin ein Hindernis bei der Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs von statischen Strukturkennzahlen (Systemaufbau) und der Resilienz dar. Dennoch erscheinen weitergehende Untersuchungen in diesem Bereich unter Berücksichtigung der zeitlichen Struktur vielversprechend. Speziell der Effekt der Überkompensation im Anschluss an eine bewältigte Störsituation bedarf einer eingehenden Analyse.

Grundsätzlich ist die vorgestellte Beurteilungssystematik unabhängig von der Fertigungsart universell einsetzbar und somit eine Vergleichsmöglichkeit zwischen zwei Produktionssystemen jederzeit gegeben. Allerdings ändert sich die Suchrichtung der Adaption strenggenommen, sobald die Bewertungsgrundlage, d. h. die zu bewältigende Produktionsaufgabe (Produktionsprogramm), sowie der entsprechende Maßstab, d. h. das betriebliche Zielsystem, variieren. Folglich existiert hier weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Abhängigkeit des identifizierten Veränderungspotenzials vom strukturellen Ausgangszustand des Produktionssystems.

Des Weiteren rückt durch die zunehmende Echtzeit-EDV-Unterstützung im betrieblichen Alltag die Entwicklung eines dynamischen Bewertungsinstrumentes unter Nutzung vorkonfigurierter Strukturmodelle auf Grundlage dieser Arbeit in greifbare Nähe. Dies stellt den nächsten Schritt zur Priorisierung von Strukturmaßnahmen unter Beachtung der geforderten Resilienz dar. Die automatisierte Generierung von Systemszenarien auf Basis unsicherer Umfeldindikatoren und simulationsgestützter Prognosen von Strukturadaptationen ermöglicht künftig eine bessere prospektive Strukturplanung.

Zudem fokussiert die Arbeit auf die Betrachtung einzelner Produktionssysteme. In einer Ausweitung der Überlegungen auf standortübergreifende Produktionsnetzwerke ergibt sich hochaktueller weiterführender Forschungsbedarf.

Darüber hinaus bedarf die vorgestellte Kosten-Leistungsrechnung einer anwendungsspezifischen Detaillierung. Wesentliche Ansatzpunkte dazu bietet diese Arbeit. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich hinsichtlich der Differenzierung der Strukturkosten vor dem Hintergrund unterschiedlicher Lebenszyklen der einzelnen Ressourcenelemente. Zudem stellt sich die Frage, inwiefern aus dem identifizierten Veränderungspotenzial die optimale Strukturadaption zuverlässig abgeleitet werden kann und wie sich dieses Vorgehen objektivieren lässt. Denn momentan beruht die Entscheidung nach wie vor auf dem Erfahrungswissen des Betriebsgestalters bzw. Fabrikplaners.

Literaturverzeichnis

[ABEL11]

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München : Hanser, 2011

[ACKE07]

Ackermann, J.: Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzzellenbasierter Netze. Dissertation, TU Chemnitz, 2007

[ADAM12]

Adams, T.; Bekkem, K.; Toledo-Durán, E.: Freight Resilience Measures. In: Journal of Transportation Engineering. Jg. 11 (2012), Nr. 138, S. 1403-1409,

[AGGT90]

Aggteleky, B.: Fabrikplanung : Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung, Bd.2: Betriebsanalyse und Feasibility-Studie. München : Hanser, 1990

[ALCA00]

Alcalde Rasch, A.: Erfolgspotenzial Instandhaltung : theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagement. Berlin : Erich Schmidt, 2000

[ANSO07]

Ansorge, D.: Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen. München : Utz, 2007

[ARIC14]

Arica, E., Strandhagen, J. O.; Hvolby, H. H.: Designing a Decision Support System for Production Scheduling Task in Complex and Uncertain Manufacturing Environments. In: B. Grabot et al. (Hrsg.): APMS 2014, Part I, IFIP AICT 438, S. 589–596.

[ARNO03]

Arnold, J.; Förster, A.; Gäse, T.: Integrative modulare Produktionssystemplanung. Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 35, TU Chemnitz, 2003

[ARNO08]

Arnold, D. et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Berlin : Springer, 2008

[ASBJ09]

Asbjørnslett, B. E.: Assessing the vulnerability of supply chains. In: G.A. Zsidisin, B. Ritchie (Hrsg.): A Handbook of Assessment, Management, and Performance. 124, Springer, USA (2009), S. 15-33

[ASBJ99]

Asbjørnslett, B. E.; Rausand, M.: Assess the vulnerability of your production system. In: Production Planning & Control. Jg. 10 (1999), Nr. 3, S. 219-229

[AWF96]

AWF – Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung e.V. (Hrsg.): Vitale Fabrik : Eine konzertierte Aktion zur Standortsicherung und –entwicklung. Eschborn : AWF, 1996

[BAUM02]

Baumeister, M.: Fabrikplanung im turbulenten Umfeld. Forschungsberichte aus dem WBK, Karlsruhe, Band 115, 2002

[BECH84]

Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1984

[BECK14]

Becker, T.; Meyer, M.: Performance and Time-Based Robustness Measures for Dynamical and Multi-variant Manufacturing Systems. The Annual Cambridge International Manufacturing Symposium : Capturing value from global networks: implications for manufacturing, supply chains and industrial policy, 2014

[BECK77]

Beckert, M. (Hrsg.): Betriebs- und Arbeitsgestaltung, Nutzensrechnung, Operationsforschung. Leipzig : Fachbuchverl., 1977, S. 11-240

[BERG08]

Bergmann, U.: Kommunikation als Optimierungskriterium. Dissertation, Universität Magdeburg, 2008

[BERT71]

Bertalanffy, L. v.: General System Theory : Foundations, Development, Applications. London : The Penguin Press, 1971

[BHAM11]

Bhamra, R.; Dani, S.; Burnard, K.: Resilience : The concept, a literature review and future directions. International Journal of Production Research. Jg. 49 (2011), Nr. 18, S. 5375–5393

[BJOR95]

Bjørke, Øyvind: Manufacturing Systems Theory. Tapir, 1995

[BOHL14]

Bohl, A.: Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität. Dissertation, RWTH Aachen, 2014

[BORN09]

Bornhäuser, M.: Reifegradbasierte Werkstattsteuerung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009

[BREC11]

Brecher, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin : Springer, 2011

[BRED14]

Bredow, v.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen. München : Utz, 2014

[BRUN03]

Bruneau, M. et al.: A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. In: Earthquake Spectra. (2003), Nr. 19, S. 733–752

[BÜCH68]

Büchel, A.: Aufbau eines Simulationsmodells der Werkstättenfertigung auf der Basis eines Markov-Prozesses. Dissertation, E.T.H Zürich, 1968

[BÜDE91]

Büdenbender, W.: Ganzheitliche Produktionsplanung und -steuerung : Konzepte für Produktionsunternehmen mit kombinierter kundenanonymer und kundenbezogener Auftragsabwicklung. Berlin : Springer, 1991

[BULL86]

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung : Handbuch für d. Praxis. München : Hanser, 1986

[BUND06]

Bundschuh, M.; Klabjan, D.; Thurston, D.L.: Modeling Robust and Reliable Supply Chains. Working Paper, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006

[BURB71]

Burbidge, J. L.: Production Flow Analysis. In: The Production Engineer. (1971), Nr. 5, S. 130-152

[BURK84]

Burkhardt, M.: Beitrag zur Ermittlung ablauforientierter Fertigungsstrukturen in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, TU Dortmund, 1984

[BURM02]

Burmann, C.: Strategische Flexibilität und Strategiewechsel als Determinanten des Unternehmenswertes. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2002

[CHAN14]

Chankov, S. M.; Becker, T.; Windt, K.: Towards Definition of Synchronization in Logistics Systems. In: Procedia CIRP. Jg. 17 (2014), S. 594–599

[CHAN16]

Chankov, S. M.; Hütt, M.-T.; Bendul, J.: Synchronization in manufacturing systems: quantification and relation to logistics performance. In: International Journal of Production Research. Jg. 54 (2016), Nr. 20, S. 6033–6051

[CORD13]

Cordes, P.; Hülsmann, M.: Dynamic Capabilities in Manufacturing Processes - A Knowledge-based Approach for

the Development of Manufacturing Flexibilities. In: Robust Manufacturing Control. Lecture Notes in Production Engineering. Windt (Hrsg.), 2013, S. 519- 534

[CORR96]

Corrêa, H.; Slack, N.: Framework to Analyze Flexibility and Unplanned Change in Manufacturing Systems. In: Computer Integrated Manufacturing Systems. Jg. 9 (1996), Nr. 1, S. 57-64

[DANG03]

Dangelmaier, W.: Produktion und Information. Berlin : Springer, 2003

[DANG97]

Dangelmaier, W.; Warnecke, H. J.: Fertigungslenkung : Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung. Berlin : Springer, 1997

[DAS95]

Das, T. K.; Elango, B.: Managing Strategic Flexibility : Key to Effective Performance. Journal of General Management. Jg. 20 (1995), Nr. 3, S. 60-75

[DEBN99]

Debbar, R.; Bruestle, T.; Kosturiak, J.: Fertigungssegmentierung durch Anwendung von Gruppentechnologie und Simulation. In: ZWF. Jg.94 (1999) 10, S.614-618

[DEGO14]

de Goede, D. M.: Understanding robustness as an image of sustainable agriculture. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL, 2014

[DETO98]

De Toni, A., Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: a literature review. In: Intern. Journal of Production Research. Jg. 36 (1998), Nr. 36, S. 1587–1617

[DIN10075]

Norm DIN EN ISO 10075-1:2015. Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung. Teil 1. Berlin : Beuth, 2015

[DIN13306]

Norm DIN EN 13306:2001. Begriffe der Instandhaltung, Berlin : Beuth, 2001

[DIN60050]

Norm DIN IEC 60050-351:2014. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. Berlin : Beuth, 2014

[DIN8580]

DIN 8580:2003-09 Fertigungsverfahren : Begriffe, Einleitung. Berlin: Beuth, 2003

[DITT81]

Dittmayer, S.: Arbeits- und Kapazitätsteilung in der Montage. Berlin : Springer, 1981

[DOHM01]

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionssysteme. Aachen : Shaker, 2001

[DOMS97]

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Berlin : Springer, 1997

[DORB11]

Dorbritz, R.: Assessing the Resilience of Transportation Systems in case of large-scale disastrous Events. The 8th International Conference of Environmental Engineering, May 19-20, 2011, Vilnius, Litauen

[DRAB06]

Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2006

[EICK09]

Eickemeyer et al.: Produktionscontrolling bei kürzeren Untersuchungszeiträumen. In: Productivity Management. Jg. 15 (2009), Nr. 4, S. 39-41

[ELES71]

El-Essawy: The Development of Component Flow Analysis in Production System Design for Multi-Product Engineering Companies. UMIST, PhD-Thesis, 1971

[ELMA09]

ElMaraghy, H.; Azaba, A.; Schuh, G.; Pulz, C.: Managing variations in products, processes and manufacturing systems. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology. Jg. 58 (2009), S. 441-446

[ELSW13]

Elsweier: Modellgestützte Diagnose in der Produktionslogistik mit einem Assistenzsystem. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2013

[EVER89]

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 4: Fertigung und Montage. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1989

[EVER99]

Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte: Produktion und Management. Berlin : Springer, 1999

[FISC09]

Fischäder, H.; Schneider, H. M.: Störparameter im Materialfluss und in Produktionssystemen. In: Schlanker Materialfluss : mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Dickmann, P. (Hrsg.). Berlin : Springer, 2009, S. 294-297

[FÖRS83]

Förster, A.: Strukturierung von Teileflußsystemen der Fertigung im Maschinenbau. Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt, 1983

[FÖRS99]

Förster, T.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsbereichen für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation, Universität Magdeburg, 1999

[FUCH95]

Fuchs, J.: Wege zum vitalen Unternehmen. Wiesbaden : Gabler, 1995

[GAGS02]

Gagsch, B.: Wandlungsfähigkeit von Unternehmen : Konzept für ein kontextgerechtes Management des Wandels. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002

[GERI81]

Gericke, E.: Verfügbarkeitsberechnung für komplexe Fertigungseinrichtungen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1981

[GLAD01]

Gladen W.: Kennzahlen und Berichtssysteme. Wiesbaden : Gabler, 2001

[GLÖC16]

Glöckner, R.; Benter, M. ; Lödding, H.: An Integrative Model of Productivity and Logistic Objectives. In: I. Nääs et al.: Advances in Production Management Systems (APMS 2016). Production Management Initiatives for a Sustainable World. Berlin : Springer, S. 1-8

[GOER09]

Goerner, S. J.; Lietaer, B.; Ulanowicz, R. E.: Quantifying economic sustainability : Implications for free-enterprise theory, policy and practice. In: Ecological Economics. Jg. 69 (2009), S. 76–81

[GOLD95]

Goldmann, S. L.; Nagel, R. N.; Preiss, K.: Agile Competitors and virtual Organizations. New York : Van Nostrand Reinhold, 1995

[GOTT78]

Gottschalk, E.: Dimensionierungsentscheide bei Berücksichtigung dynamisch und stochastisch beeinflusster Projektierungsgrößen. Dissertation, TH Magdeburg, 1978

[GÖTZ10]

Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. Heidelberg : Springer, 2010

[GROC95]

Grochla, E.: Grundlagen der organisatorischen Gestaltung. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1995

[GRUN08]

Grundmann, S.: Planung flexibler Produktionskapazitäten im Spannungsfeld logistischer und monetärer Ziele. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008

[GRUN12]

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Fertigungssystematik – Methoden – Anwendungen. München : Hanser, 2012

[GUTE84]

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Berlin : Springer, 1984

[HACK89]

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS) : ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1989

[HAHN70]

Hahn, R., Kunerth, W., Roschmann, K.: Die Teileklassifizierung : Systematik und Anwendung im Rahmen der betrieblichen Nummerierung. 1970

[HALL99]

Haller, M.: Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Großserienfertigung. München : Utz, 1999

[HANS01]

Hans, L.: Grundlagen der Kostenrechnung. Oldenburg : De Gruyter, 2001

[HARM03]

Harms, T.; Lopitzsch, J.; Nickel R.: Integrierte Fabrikstrukturierung und Logistikkonzeption. Effiziente Fabrikplanung durch Phasen der Kommunikation und Konzentration. In: wt Werkstattstechnik, Jg. 93 (2003), Nr. 4, S. 227-232

[HART02]

Hartmann, H.: Materialwirtschaft : Organisation, Planung, Durchführung, Kontrolle. Gernsbach : Deutscher Betriebswirte-Verlag, 2002

[HART95]

Hartmann, M.: Merkmale zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen bei turbulenten Aufgaben. In: Innovative Produktionsforschung, Band 1. Hrsg.: Kühnle, H. Stuttgart, LOGIS-Verlag, 1995

[HEGE06]

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2006

[HEIN06]

Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. München : UTZ, 2006

[HEIN16]

Heinicke, M.: Influence of Shifts in Production Programs on the Resilience of Production Systems. In: Procedia CIRP, Jg. 41 (2016), S. 117-122. 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2015)

[HELB10]

Helbing, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin : Springer, 2010

[HEND74]

Henderson, B. D.: Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie. Frankfurt a. M. : Herder und Herder, 1974

[HENN99]

Henn, G.; Kühnle, H.: Strukturplanung. In: G. Schuh, W. Eversheim (Hrsg.): Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin : Springer, 1999

[HERI14]

Hering, E.: Kalkulation für Ingenieure. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014

[HERM16]

Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). 1. Januar 2016, S. 3928–3937

[HERN02]

Hernandez Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2002

[HERN05]

Hernández, R.; Wiendahl, H.-P.: Die wandlungsfähige Fabrik – Grundlagen und Planungsansätze. In B. Kaluza & T. Blecker, (Hrsg.), Erfolgsfaktor Flexibilität – Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen. Berlin : Erich Schmidt, 2005, S. 203–227

[HILD05]

Hildebrand, T.; Mäding, K.; Günther, U.: PLUG + PRODUCE : Gestaltungsstrategien für die wandlungsfähige Fabrik. IBF, TU Chemnitz, 2005

[HOIT07]

Hoitsch, H.-J.; Lingnau, V.: Kosten- und Erlösrechnung. Berlin : Springer, 2007

[HOLL96]

Holling, C. S.: Engineering Within Ecological Constraints. 1996

[HOPP01]

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics : Foundations of Manufacturing Management. Boston : McGraw-Hill/Irwin, 2001

[HORV11]

Horváth, P.: Controlling. München : Vahlen, 2011

[INDE08]

Inderfurth, K.; Schulz, T.: Zur optimalen Parametrisierung der Lagerkennlinie nach Nyhuis/Wiendahl. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer : Berlin. 2008

[JAIN93]

Jainczyk, M.: Logistikorientierte Bewertung von Investitionsvorhaben im Produktionsbereich. In: Wiendahl, H.-P.: Neue Wege der PPS. Tagungsbericht IFA-Kolloquium, Gesellschaft für Management und Technologie, Hannover, 1993, S. 131-154

[JODL08]

Jodlbauer, H.: Produktionsoptimierung. Wien : Springer. 2008

[JODL08a]

Jodlbauer, H.; Huber, A.: Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. International Journal of Production Research, Jg. 46, Nr. 8, 15 April 2008, 2179–2195

[JÜNE00]

Jünemann, R.: Materialflußsysteme. Berlin: Springer, 2000

[KALU05]

Kaluza, B., Blecker, Th.: Flexibilität – State of the Art und Entwicklungstrends. In: Kaluza, B., Blecker, Th. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen. Berlin : Erich Schmidt, 2005

[KALU94]

Kaluza, B.: Rahmenentscheidungen zu Kapazität und Flexibilität produktionswirtschaftlicher Systeme. In: Corsten, H. (Hrsg.): Handbuch des Produktionsmanagements, Strategie-Führung-Technologie-Schnittstellen. Wiesbaden : Gabler, 1994

[KAPP11]

Kapp, R.: Ein betriebsbegleitendes Fabriksimulationssystem zur durchgängigen Unterstützung der kontinuierlichen Fabrikadaption. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011

[KAUT96]

Kautz, W.-E.: Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme : Konzept zur technisch-ökonomisch begründeten Auswahl. Wiesbaden : Gabler, 1996

[KENN15]

Kennemann, M.: Produktionscontrolling dynamischer Prozesse auf Basis von Produktionskennlinien. Garbsen: PZH, 2015

[KERN02]

Kerner, A.: Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Dissertation, Universität Hannover, 2002

[KETT84]

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden zur systematischen Fabrikplanung. München : Hanser, 1984

[KIDD94]

Kidd, P.T.: Agile Manufacturing, Forging new frontiers. Wokingham, 1994

[KIEN11]

Kienle: Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten, 2011

[KIRC05]

Kirchler, E. (Hrsg.): Arbeits- und Organisationspsychologie. Stuttgart : Fakultas, 2005

[KIST01]

Kistner, K.-P.; Steven, M.: Produktionsplanung. Heidelberg : Physica, 2001

[KITA04]

Kitano, H.: Biological robustness. In: Nature Reviews Genetics. Nr. 5, 826–837 (1 November 2004)

[KLÄB86]

Kläbsch, R.-A.: Bildung und Vorausbestimmung von Niveaustufen zur rationellen Gestaltung autonomer Fertigungsstrukturen der Teilefertigung. Dissertation, TU Magdeburg, 1986

[KLAU04]

Klaus, P.; Krieger, W.: Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Wiesbaden : Gabler, 2004

[KLEM14]

Klemke, T.: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Garbsen: PZH, 2014

[KLET06]

Kletti, J.: Manufacturing Execution System - Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. Berlin : Springer, 2006

[KLET07]

Kletti, J.: Konzeption und Einführung von MES-Systemen. Berlin : Springer, 2007

[KOBY00]

Kobylka, A.: Simulationsbasierte Dimensionierung von Produktionssystemen mit definierten Potenzial an Leistungsfreiheit. Dissertation, TU Chemnitz, 2000

[KOET01]

Koether, R.; Kurz, B.; Seidel, U. A.; Weber, F.: Betriebsstättenplanung und Ergonomie: Planung von Arbeitssystemen. München : Hanser, 2001

[KÖHL96]

Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen, variantenreichen Kleinserienprodukten. Berlin : Springer, 1996

[KÖTT16]

Kötter, W. et al. (Hrsg.): Balanced GPS. Wiesbaden : Springer, 2016

[KREB12]

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. München : Utz, 2012

[KRÜG04]

Krüger, A.: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. München : Utz, 2004

[KUH95]

Kuhlmann, A.: Einführung in die Sicherheitswissenschaft. Köln : TÜV Rheinland, 1995

[KÜHN06]

Kühn, W.: Digitale Fabrik : Fabriksimulation für Produktionsplaner. München : Hanser, 2006

[KÜHN09]

Kühnle: Distributed Manufacturing. Berlin : Springer, 2009

[KÜHN15]

Kühnle, H.; Bitsch, G.: Foundations & Principles of Distributed Manufacturing. Heidelberg : Springer, 2015

[KÜHN94]

Kühnle, H.: Die Fraktale Fabrik – Neue Organisationsformen. In: Kuhnert, W.: Menschen, Maschinen, Märkte. Berlin : Springer, 1994, S. 89-100

[KUPR91]

Kuprat, T.: Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität von Produktionsstrukturen. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Nr. 228. Düsseldorf : VDI-Verlag. 1991

[LAGE08]

Lagemann, F.; Lagemann, J.: Erfolgsfaktor Störung : das Ungeplante planen. In: Automation : Lösungen für die Zukunft (VDI Berichte 2032), 2008, S. 105-110

[LAND15]

Landherr, M. H.: Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation Universität Stuttgart, 2015

[LECH93]

Lechner, S.: Betriebstypologische Auswahl von Standardsoftware zur Produktions-Planung und -Steuerung (PPS). Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993

[LING94]

Lingnau, V.: Variantenmanagement : Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie. Berlin : Erich Schmidt, 1994

[LITT61]

Little, J. D. C.: A Proof of the Queueing Formula $L = \lambda W$. In: Operations Research. Operations Research. Jg. 9 (1961), Nr. 3 (May - Jun.), S. 383-387

[LÖDD08]

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin : Springer, 2008

[LÖFF11]

Löffler, C.: Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011

[LOHS02]

Lohse, A.: Auftragsmanagement von komplexen Produkten in agilen Unternehmensstrukturen. Aachen: Shaker, 2002

[LOPI05]

Lopitzsch, J.: Segmentierte Adaptive Fertigungssteuerung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2005

[LORE96]

Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen. Dissertation, TU München, 1996

[LÜCK99]

Lücke, O.: Methodische Nutzung der betrieblichen Lernfähigkeit. Essen : Vulkan, 1999

[LUCZ99]

Luczak, H.; Eversheim, W.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Berlin : Springer, 1999

[LUEG75]

Lueg, H.: Systematische Fertigungsplanung. Würzburg : Vogel, 1975

[MAIN08]

Mainzer, K.: Komplexität. Paderborn: UTB, 2008

[MAND87]

Mandelbaum, M.: Flexibility in decision making: an exploration and unification. PhD Dissertation, Department of IE, University of Toronto, 1987

[MARK91]

Marks, S.: Gemeinsame Gestaltung von Technik und Organisation in soziotechnischen kybernetischen Systemen, Düsseldorf : VDI, 1991

[MART89]

Martin, J.: Gruppentechnologische Fertigungsstrukturen : Planung und Bewertung bei Einzel- und Kleinserienfertigung. Köln: TÜV Rheinland, 1989

[MASS93]

Maßberg, W. (Hrsg.): Fertigungsinseln in CIM-Strukturen. Berlin : Springer, 1993

[MASS99]

Maßberg, W.; Sossna, F.: Gruppentechnologische Fabrikstrukturen in wandlungsfähigen Fabriken. Wt Werkstattstechnik online. Jg. 89 (1999) H.1/2, S. 23-26

[MATY02]

Matyas, Kurt: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. In: Industrie Management : Instandhaltung und Wissensmanagement (2002), Nr. 2, S. 13-16

[MATY05]

Matyas, K.: Taschenbuch Instandhaltungslogistik. München : Hanser, 2005

[MCDA08]

McDaniels, T et al.: Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. In: Global Environmental Change. 2008, Nr. 18, S. 310–318

[MELLE81]

Mellerowicz, K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie. Freiburg : R. Haufe, 1981

[MEXI94]

Mexis, N. D.; Hennig, J.: Handbuch Schwachstellenanalyse und –beseitigung. Köln : TÜV Rheinland, 1994

[MEYE16]

Meyer, M.: Redundancy Investments in Manufacturing Systems. Dissertation, Jacobs University, Bremen, 2016

[MITR60]

Mitrofanow, S. P.: Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie. Berlin : Verlag Technik, 1960

[MÖLL08]

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. München : Utz, 2008

[MÖSS99]

Mößmer, H. E.: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme. München : Utz, 1999

[MUNO15]

Munoz, A.; Dunbar, M.: On the quantification of operational supply chain resilience. In: International Journal of Production Research. Jg. 53 (2015), Nr. 22, S. 6736–6751

[NUSS11]

Nußbaum, C. L.: Modell zur Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität. Aachen : Apprimus, 2011

[NYHU08]

Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin : Springer, 2008

[NYHU09]

Nyhuis, Hartmann, Kennemann, Münzberg: Produktionsregelung mit logistischen Kennlinien. In: wt – Werkstattstechnik. Jg. 99 (2009), H. 4, S. 239 – 243

[NYHU12]

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Berlin : Springer, 2012

[NYHU13]

Nyhuis, P.; Deuse, J.; Rehwald, J.: Wandlungsfähige Produktion : Heute für morgen gestalten. Garbsen : PZH, 2013

[OERT09]

Oertelt, S.: Innovationscontrolling : Ganzheitliches Verfahren zur Priorisierung und Steuerung von Vorentwicklungsprojekten. Aachen : Shaker, 2009

[OHNO09]

Ohno: Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt : Campus, 2009

[OKIN94]

Okino, N.: Bionic Manufacturing System. In: Manufacturing Systems. Jg. 23 (1994), Nr.3, S. 175-187

[OLFE10]

Olfert, K.: Kostenrechnung. Herne : Kiehl, 2010

[OPIT66]

Optiz, H.: Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem. Essen : Girardet, 1966

[PATZ82]

Patzak, G.: Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme : Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin : Springer, 1982

[PAWE08]

Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Berlin : Springer, 2008

[PETT96]

Patterson, R.: The Agility Revolution – A New Paradigm for Business. 1996 NGMS International Conference. Irvine, February 5-9, 1996

[PFOH97]

Pfohl, H.-C: Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe. Berlin : Schmidt, 1997

[PLIN02]

Plinke, W.; Rese, M.: Industrielle Kostenrechnung. Berlin : Springer, 2002

[POHL14]

Pohl, J.: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. München : Utz, 2014

[RABE80]

Rabus, G.: Typologie zum überbetrieblichen Vergleich von Fertigungssteuerungsverfahren im Maschinenbau. Berlin : Springer, 1980

[REFA06]

REFA Bundesverband e.V. (Hrsg.): Arbeitssystem- und Prozessgestaltung. Darmstadt : REFA, 2006

[REFA90]

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München : Hanser, 1990

[REFA91]

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung - Teil 1-6. München : Hanser, 1991

[REFA93]

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation : Lexikon der Betriebsorganisation. München : Hanser, 1993

[REFA93a]

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.): Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums. München : Hanser, 1993

[REIN00]

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H. (Hrsg.): Münchner Kolloquium – nur der Wandel bleibt: Wege jenseits der Flexibilität. München : Utz, 2000, S. 17–40

[REIT03]

Reitsma, F.: A response to simplifying complexity. In: Geoforum. Jg. 34 (2003), Nr. 1, Pergamon Press, Elsevier, S. 13-16

[REUT11]

Reuter, M.; Zacher, S.: Regelungstechnik für Ingenieure. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011

[RICK90]

Rickert, M.: Marktgerechte Gestaltung der Produktionsorganisation. Köln : TÜV Rheinland, 1990

[RIET01]

Rietz, S.: Methodik zur zieladäquaten Bildung von Fertigungsgrobstrukturen. Magdeburg : GESIS, 2001

[RINZ92]

Rinza, P.; Schmitz, H.: Nutzwert-Kosten-Analyse. Betriebswirtschaft und Betriebspraxis. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1992

[RISS02]

Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie : Ein Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement. Dissertation, TU Berlin, 2002

[ROPO09]

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie : Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe : Universitätsverlag, 2009

[ROPO12]

Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie : Einführung in transdisziplinäres Denken. Berlin: edition sigma, 2012

[ROSE01]

Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: A Practical Bottleneck Detection Method. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, edited by Brett A Peters, Jeffrey S Smith, D. J Medeiros, and Matt W Rohrer, 2, S. 949–953. Arlington, Virginia, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001

[ROSE02]

Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: Detecting Shifting Bottlenecks. In: International Symposium on Scheduling, 59–62. Hamamatsu, Japan, 2002

[RÖTZ01]

Rötzel, A.: Instandhaltung : eine betriebliche Herausforderung. Berlin : VDE, 2001

[SAIN75]

Sainis, P.: Ermittlung von Durchlaufzeiten in der Werkstattfertigung aus Daten des Fertigungsprogramms mit Hilfe der Warteschlangentheorie. Dissertation, Universität Hannover, 1975

[SCHA75]

Scharf, P.: Strukturalternativen integrierter, flexibler Fertigungssysteme und ihre Bewertung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1975

[SCHE14]

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb : Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin : Springer, 2014

[SCHI89]

Schiffer, F.; Tempelhof, K.-H.: Fertigungsprozeßgestaltung im Maschinen- und Gerätebau. Berlin: Verlag Technik, 1989

[SCHM01]

Schmahls, T.: Beitrag zur Effizienzsteigerung während Produktionsanläufen in der Automobilindustrie. Dissertation, TU Chemnitz, 2001

[SCHM70]

Schmigalla, H.: Methoden zur optimalen Maschinenanordnung. Berlin : VEB Verlag Technik. 1970

[SCHM95]

Schmigalla, H.: Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge. München : Hanser, 1995

[SCHN04]

Schneider, M.: Logistische Fertigungsbereichskennlinien Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 647. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004

[SCHN96]

Schneeweiß, C.: Flexibilität, Elastizität und Reagibilität. In: Kern, W; Schröder, H.-H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart : Schäffer-Poeschel 1996, S. 490 - 502

[SCHO10]

Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Liu, H.: Modelling Dynamic Bottlenecks in Production Networks. In: G. Huang et al. (Hrsg.): DET2009 Proceedings, AISC 66, S. 1445–1463. Springer : Berlin. 2010

[SCHÖ16]

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Berlin : Springer Vieweg, 2016

[SCHO80]

Schomburg, E.: Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau. Dissertation, TH Aachen, 1980

[SCHU12]

Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS. Berlin: Springer, 2012

[SCHU13]

Schuh G, Potente T, Thomas C. Design of Production Control's Behavior. Forty sixth CIRP conference on manufacturing systems 2013; 2013. S. 145–50 (1–2)

[SCHU78]

Schulze, T.: Analyse der Auswirkungen stochastischer Veränderungen von Produktionsprogrammen auf den Arbeitszeitaufwand und die technologische Struktur von Betrieben der metallverarbeitenden Industrie. Dissertation, TH Magdeburg, 1978

[SCHW90]

Schweitzer, M.: industrielle Fertigungswirtschaft. In: Schweitzer, M. (Hrsg.): Industriebetriebslehre. Das Wirtschaften in Industrieunternehmen. München, 1990

[SEST03]

Sesterhenn, M: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Aachen : Shaker. 2003

[SHEF05]

Sheffi, Y.; Rice, J. B.: A Supply Chain View of the Resilient Enterprise. In: MIT Sloan Management Review Jg. 47 (2005), Nr. 1, S. 42-48

[SLAC87]

Slack, N.: The Flexibility of Manufacturing Systems. In: International Journal of Operations & Production Management Jg. 7 (1987), Nr. 4, S. 35-45

[SOKO38]

Sokolovski, A. P.: Probleme der Typisierung technologischer Prozesse. Moskau: LONITOMASCH, 1938

[STRI14]

Stricker, N.; Lanza, G.: The Concept of Robustness in Production Systems and its Correlation to Disturbances. In: Procedia CIRP, Vol. 19 (2014), S. 87-92. Robust Manufacturing Conference (RoMaC 2014)

[STRU04]

Strunk, G.: Organisierte Komplexität. Dissertation, Universität Bamberg, 2004

[STRU14]

Strunk, G.; Schiepek, G.: Therapeutisches Chaos. Eine Einführung in systemisches Denken und Komplexitätstheorie. Göttingen : Hogrefe, 2014

[SYDO85]

Sydow, J.: Der soziotechnische Ansatz der Arbeits- und Organisationsgestaltung. Frankfurt/M. : Campus, 1985

[TIER07]

Tierney, K.; Bruneau, M.: Conceptualizing and Measuring Resilience: A key to Disaster Loss Reduction. TR News, Transportation Research Board on the National Academics, 250, May – June 2007, S. 14-17

[TREU90]

Treutlein, K.: Materialflußorientierte Termin- und Kapazitätsplanung. Berlin : Springer, 1990

[TUFF88]

Tuffentsammer, K. (Hrsg.): Flexibles Fertigungssystem. Düsseldorf : VDI, 1988

[UCKE11]

D. Uckelmann, M. Harrison, F. Michahelles (Hrsg.): Architecting the Internet of Things. Berlin : Springer, 2011

[UEDA96]

Ueda, K.: Biological Manufacturing Systems. 1996 NGMS International Conference. Irvine, February 5-9, 1996

[ULRI01]

Ulrich, E.: Arbeitspsychologie. Stuttgart : Schäfer-Pöschel, 2001

[ULRI88]

Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Bern: Haupt, 1988

[UNBE11]

Unbehauen, H.: Regelungstechnik. Braunschweig : Vieweg, 2011

[VASI05]

Vasilescu, G.: Electronic noise and interfering signals: principles and applications. Berlin: Springer, 2005

[VDA07]

Verband der deutschen Automobilindustrie e.V.: Produktherstellung und –lieferung – Robuster Produktionsprozess. Frankfurt/M. : Heinrich Druck + Medien, 2007

[VDI3633]

Norm VDI 3633-1:2014. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Berlin : Beuth, 2014

[VDI4499]

Norm VDI 4499-1:2008. Digitale Fabrik : Grundlagen. Berlin : Beuth, 2008

[VLAJ12]

Vlajic J.V.; van der Vorst, J. G. A. J.; Haijema, R.: A framework for designing robust food supply chains. International Journal of Production Economics. 2012, 137(1), S. 176-189.

[WARN92]

Warnecke, H.-J.: Die Fraktale Fabrik: Revolution in der Unternehmenskultur. Berlin : Springer, 1992

[WARN95]

Warnecke, H.-J.: Aufbruch zum Fraktalen Unternehmen. Berlin : Springer, 1995

[WEST00]

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. wt 90 (2000) H.1 2, S. 22-26

[WEST00a]

Westkämper, E.; Pritschow, G.; Wiendahl, H.-H.; Rempp, B.; Schanz, M.: Turbulenz in der PPS - eine Analogie. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000) 5, S. 203-207

[WEST16]

Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Berlin : Springer Vieweg, 2016

[WEST99]

Westkämper, E.; Wiendahl, H.-H.; März, L.: Fabrikplanung und Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen. In: ZWF, Jg. 94 (1999) 10, S. 610-613

[WIEL12]

Wieland, A.; Wallenburg, C. M.: Dealing with supply chain risks : Linking risk management practices and strategies to performance. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Jg. 42 (2012), H. 10, S. 887-905

[WIEL13]

Wieland, A.; Wallenburg, C. M.: The influence of relational competencies on supply chain resilience. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Jg. 43 (2013), Nr. 4, S. 300-20

[WIEN02]

Wiendahl, H.-H.: Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002

[WIEN02a]

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit : Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. wt Werkstattstechnik online, Jg. 92 (2002), Nr. 4, S. 122-127

[WIEN02b]

Wiendahl, H.-P.; Windt, K.; Lopitzsch, J.; Schneider, M.: Managing Bottleneck Resources in Production Networks. Hirschall A.; Jagdev, H.; Pels, H.-J.; Wortmann, H. (Hrsg.): Collaborative Systems for Production Management, Preprints of Proceeding of APMS 2002, International Conference on Advanced Production Management Systems, Eindhoven, 08.-13. September 2002

[WIEN04]

Wiendahl, H.-P.: Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin : Springer, 2004

[WIEN05]

Wiendahl, H.-P., Nofen, D., Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken. München : Hanser, 2005

[WIEN06]

Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld: Teil 1 – Anforderungen. wt Werkstattstechnik online, Jg. 96 (2006), Nr. 4, S. 325–330

[WIEN09]

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. München : Hanser, 2009

[WIEN09a]

Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: ZWF, Jg. 104 (2009), Nr. 1-2, S. 32-37

[WIEN97]

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München : Hanser, 1997

[WIEN99]

Wiendahl, H.-P.; Ahrens, V.; Burmeister, M.; et. al.: Fabrikplanung: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W., Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin : Springer, 1999

[WIEN99a]

Wiendahl, H.-P.; Breithaupt, J.-W.: Modelling and controlling the dynamics of production systems. In. Production Planning & Control, Jg. 10 (1999), Nr. 4, S. 389-401

[WILD89]

Wildemann, H.: Fabrikplanung. Frankfurt /M. : Frankfurter Allg. Zeitung, 1989

[WILD94]

Wildemann, H.: Die Modulare Fabrik : Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. München : TCW-Transfer-Centrum, 1994

[WILM08]

Wilms, H.: Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Dissertation, RWTH Aachen, 2008

[WIND01]

Windt, K.: Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen (Diss.). In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 579, Düsseldorf, 2001

[WINK07]

Winkler, H.: Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Dissertation, Universität Hannover, 2007

[WINK94]

Winkler, M., Mey, M.: Holonic Manufacturing Systems. In: European Production Engineering. Jg. 18 (1994), Nr. 3-4, S. 10-12

[WIRT89]

Wirth, S.: Flexible Fertigungssysteme : Gestaltung und Anwendung in der Teilefertigung. Berlin: Verlag Technik, 1989

[WÖHE13]

Wöhe, G., Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München : Vahlen, 2013

[WOIT62]

Woithe, G.: Die Ermittlung der Produktionskapazität von Montageabteilungen in Maschinenbaubetrieben. Dissertation, HU Berlin, 1962

[WOIT76]

Woithe, G.; Gottschalk, E.: Dynamik und Stochastik der Produktionsentwicklung. Forschungsbericht, Wissenschaftsbereich Betriebsgestaltung, TH Magdeburg, 1976

[WOIT77]

Woithe, G.: Betriebsgestaltung. Aus: Beckert, M. (Hrsg.): Betriebs- und Arbeitsgestaltung, Nutzensrechnung, Operationsforschung; Leipzig : Fachbuchverl., 1977

[WORB03]

Worbs, J.: Modellierung und Analyse turbulenter produktionslogistischer Prozesse mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. Düsseldorf : VDI. 2003

[WÖRT04]

Wörterbuch der Fertigungstechnik. Bd. 3, Berlin : Springer, 2004

[ZANG76]

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik : eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. München : Wittmann, 1976

[ZEHB96]

Zehbold, C.: Lebenszyklusrechnung. Wiesbaden : Gabler, 1996

[ZEUG98]

Zeugträger, K.: Anlaufmanagement für Großanlagen. Düsseldorf : VDI, 1998

[ZÜLC89]

Zülch, G.: Der strategische Steuerungsraum : Ein Ansatz zur Systematisierung von Strategien der Fertigungssteuerung. VDI-Zeitschrift, Nr. 5, 1989

[ZÜLC90]

Zülch, G.: Systematisierung von Strategien der Fertigungssteuerung. In: Zahn, E.; Bullinger, H. (Hrsg.): Organisationsstrategie und Produktion. München : Gfmt; 1990, S. 151–178

Anhang

ANHANG A: ERMITTLUNG DER DATEN FÜR DEN BETRIEBSPUNKT	IV
ANHANG B: VORGEHEN ZUR BEURTEILUNG DER STRUKTUREIGNUNG	V
ANHANG C: ERWEITERUNG DES ROBUSTHEITSBEGRIFFS	IX
ANHANG D: ENTFERNUNGSMATRIZEN DES BELASTUNGSSZENARIOS	X
ANHANG E: KENNGRÖßEN DES BELASTUNGSSZENARIOS	XI
ANHANG F: KENNGRÖßEN DES BEANSPRUCHUNGSSZENARIOS	XIII
ANHANG G: EXEMPLARISCHE KOSTENBEWERTUNG	XIV

Anhang A: Ermittlung der Daten für den Betriebspunkt

Gegeben:

- **Produktionsprogramm**, d. h. Anzahl der jeweiligen Produktarten in einem Betrachtungszeitraum (zeitliche Folge → Annahme: Gleichverteilung), sowie
- **technologische Daten des Produktionssystems**, d. h. Art und Anzahl der Arbeitsmittel/Arbeitsysteme, und
- **Arbeitsplandaten**, d. h. Arbeitsfolgegraph (Bearbeitungsfolge der Aufträge über alle Arbeitsmittel) sowie Vorgabe-/Planzeiten der Bearbeitung der jeweiligen Produktarten auf den unterschiedlichen Arbeitsmitteln/-systemen

Gesucht:

Betriebspunkte des Gesamtsystems

- **Mittlerer Bestand** des Gesamtsystems B_m [h]
 - Mittlere Differenz von Zugangs- und Abgangskurve
 - Variante A: Ermittlung über Bestandsflächen
 1. Kumulation der Zugangsflächen des Bestandes im Betrachtungszeitraum T: $\sum ZAU_p \cdot T_{ZU,p}$
 2. Kumulation der Abgangsflächen des Bestandes im Betrachtungszeitraum T: $\sum ZAU_p \cdot T_{AB,p}$
 3. Bildung der Differenz von Zugangs- und Abgangsfläche
 4. Aufsummierung der diskreten Bestandsflächen $B_m = \frac{\int_{T_0}^{T_1} ZU(T) dT - \int_{T_0}^{T_1} AB(T) dT}{T_1 - T_0}$
 - Variante B: Ermittlung über Regressionsgerade für Zugang und Abgang
 1. Ermittlung von Regressionsgerade für Zugangskurve und Abgangskurve jeweils auf Basis der Rückmeldezeitpunkte aus der Simulation für alle gefertigten Produkte im Betrachtungszeitraum
 2. Ermittlung der Differenzen der Regressionsgeraden für zwei exemplarische Punkte:
 - a. Erstes Produkt verlässt Gesamtsystem (1. Abgangszeitpunkt)
 - b. Ende des Betrachtungszeitraums
 3. Berechnung des Mittelwertes der in 2. ermittelten Differenzen → mittlerer Bestand
- **Mittlere Leistung** des Gesamtsystems L_m [h/BKT]
 - Summe der Gesamtbearbeitungszeiten aller bearbeiteten Aufträge im Betrachtungszeitraum
 - 1. Ermittlung der Gesamtbearbeitungszeiten aller Produkte $\sum ZAU_p$ [h]
 - 2. Ermittlung der Anzahl aller im Betrachtungszeitraum T [BKT] fertiggestellten Produkte je Produktart p
 - 3. Berechnung des Mittelwertes: $L_m = \frac{\sum p \cdot ZAU_p}{T}$
- **Mittlere Durchlaufzeit** des Gesamtsystems DLZ_m [BKT]
 - stückzahlgewichtete mittlere Durchlaufzeit aller Produkte
 - 1. Ermittlung der Gesamtdurchlaufzeit je Produkt $\sum DLZ_p$ [h] über Zugang und Abgang aus dem Gesamtsystem
 - 2. Ermittlung der Anzahl aller im Betrachtungszeitraum fertiggestellten Produkte je Produktart p
 - 3. Berechnung des Mittelwertes: $DLZ_m = \frac{\sum DLZ_p}{p}$
 - 4. Umrechnung in DLZ_m [BKT] unter Berücksichtigung des mittleren Schichtfaktors:

$$s_m = \frac{\sum (s_i \cdot \#BM_i)}{\sum \#BM_i} \rightarrow DLZ_m [BKT] = \frac{DLZ_m [h]}{s_m}$$

Anhang B: Vorgehen zur Beurteilung der Struktureignung

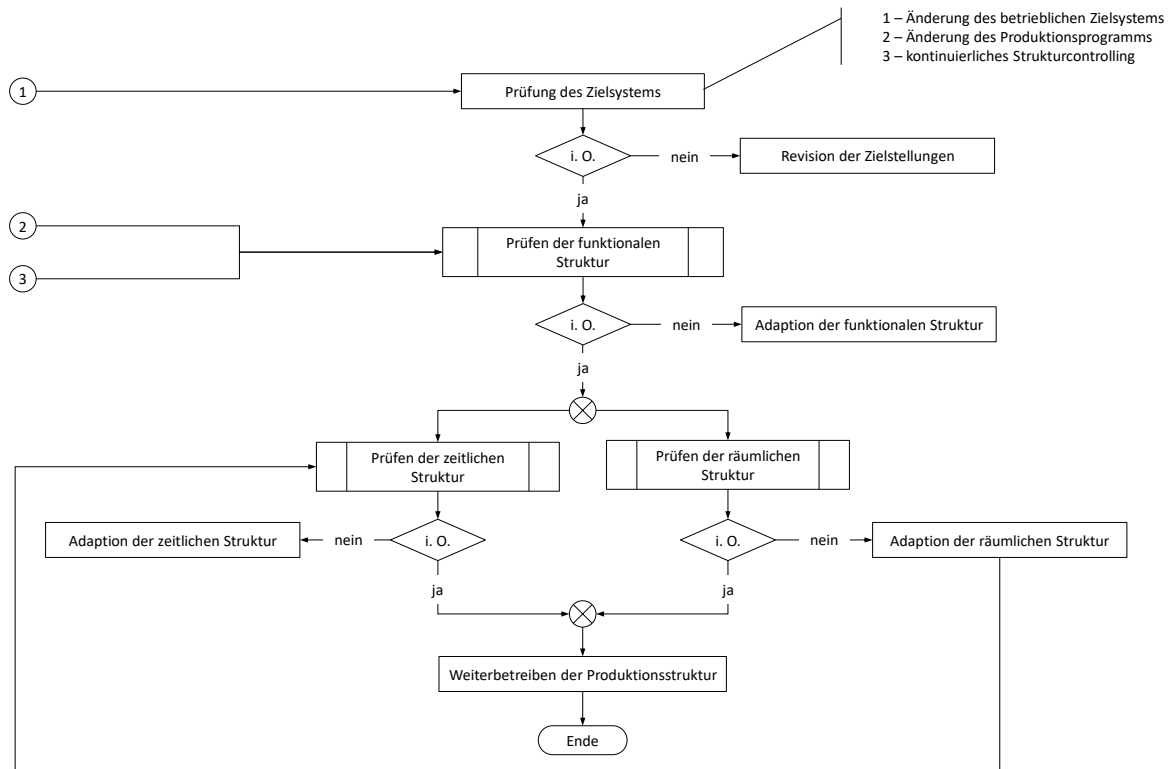


Abbildung B-1: Vorgehen zur Prüfung der Struktureignung

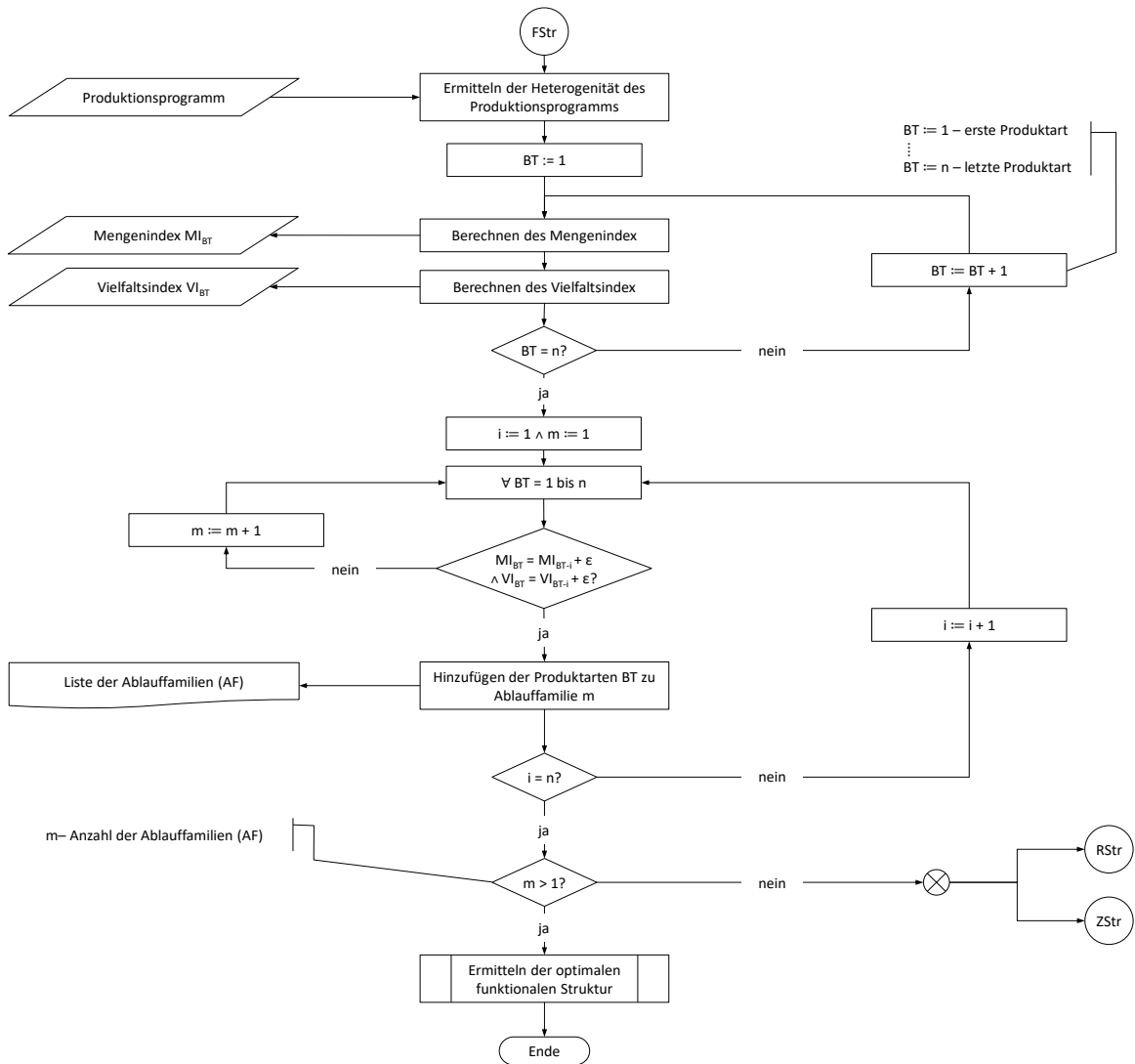


Abbildung B-2: Vorgehen zur Beurteilung der funktionalen Struktur

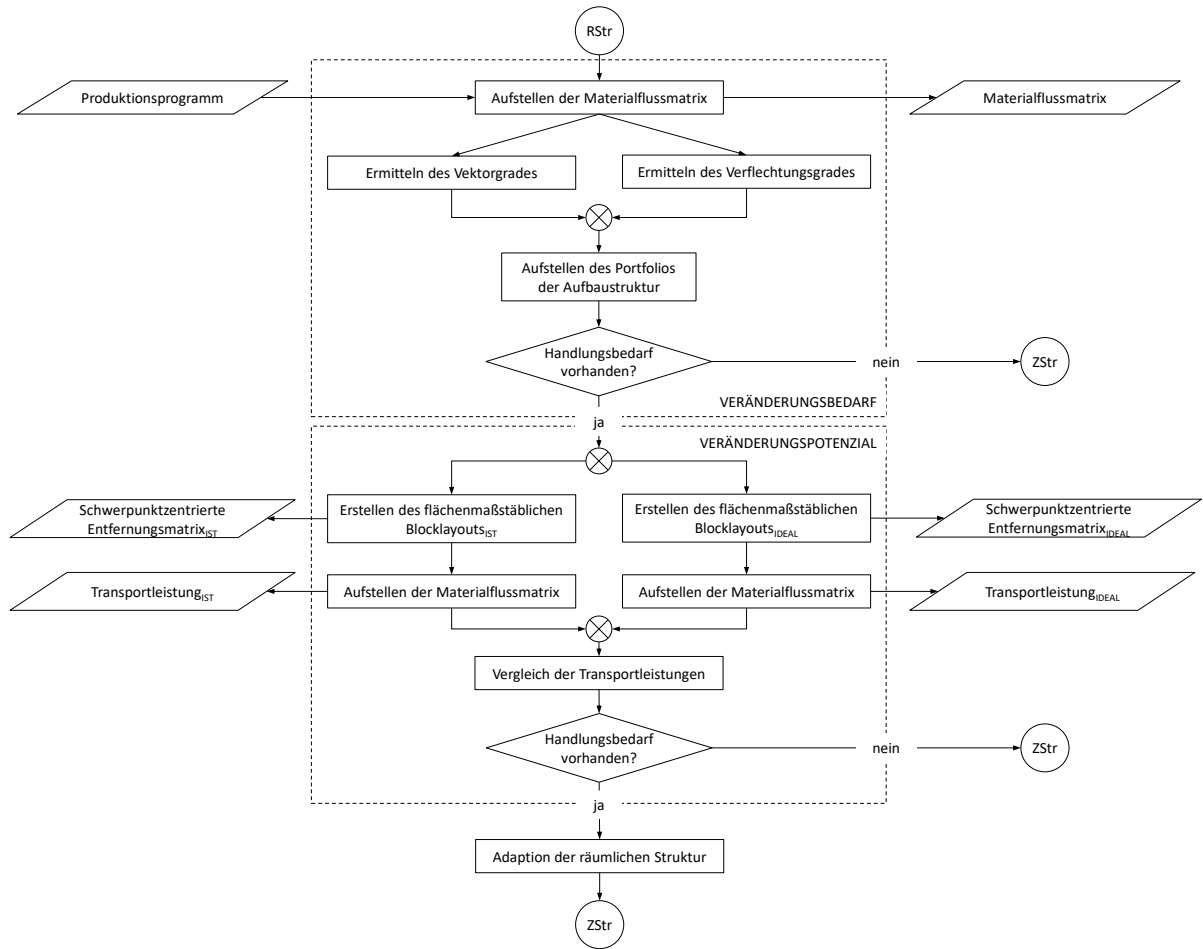


Abbildung B-3: Vorgehen zur Beurteilung der räumlichen Struktur

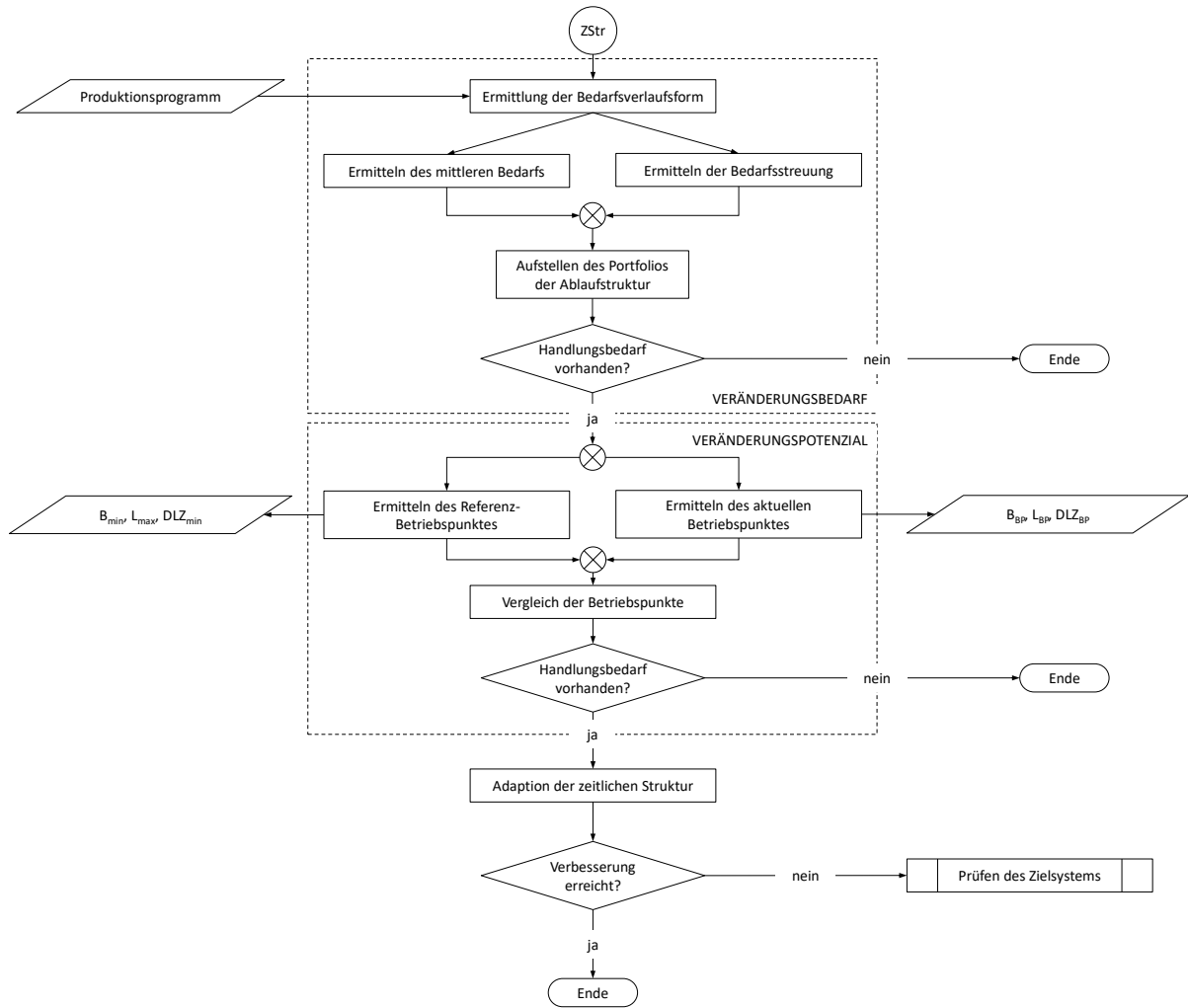


Abbildung B-4: Vorgehen zur Beurteilung der zeitlichen Struktur

Anhang C: Erweiterung des Robustheitsbegriffs

Stand bei der bisherigen Beurteilung der Resilienz stets die Störung des (geplanten) Systemverhaltens im Fokus, lässt sich diese Denkweise auch auf turbulenzinduzierte Umweltveränderungen wie die Verschiebungen der Kundennachfragen (geändertes Produktionsprogramm) erweitern. Bei Betrachtung aller drei Strukturebenen kann der Robustheitsbegriff daher differenziert werden.

Im Kontext der zeitlichen Struktur bezieht er sich weiterhin auf den angestrebten Betriebspunkt und das Systemverhalten, weswegen neben dem Effektivitätskriterium Leistung auch das Heranziehen der ergänzenden Formalziele (Durchlaufzeit, Umlaufbestand oder Termintreue) durchaus denkbar ist, bezüglich denen sich ein Produktionssystem robust verhalten soll. Die Aufrechterhaltung der Funktionalität kann demzufolge anhand produktionslogistischer und kostenseitiger Kennzahlen beurteilt werden. Robustheit liegt hierbei vor, wenn es trotz Veränderung des Produktionsprogramms (Einlastungsverhaltens) oder Störungen zu keinen nennenswerten Änderungen (→ Definition eines Toleranzbereiches erforderlich) der Zielparameter (Leistung/Durchsatz, Durchlaufzeit, Bestand, Termintreue) kommt.

Sobald die räumliche Struktur im Fokus steht, ist eine Anordnung als robust zu bezeichnen, deren Optimalität bzw. Qualität nicht durch eine Veränderung des Produktionsprogramms in Frage gestellt wird. Demzufolge hat das Hinzukommen bzw. der Wegfall einer Produktart, die Veränderung ihres Mengenrüssts oder ihres zeitlichen Abrufverhaltens keine nennenswerten Änderungen (→ Definition eines Toleranzbereiches erforderlich) des Zielparameters Transportleistung bzw. -kosten zur Folge.

Mit Blick auf die funktionale Struktur wird die Systemzusammensetzung und die Bildung der Leistungseinheit an sich betrachtet. Hierbei bezieht sich die Robustheit wiederum darauf, dass sich Verschiebungen im Produktionsprogramm nicht auf die Entscheidung der Zuordnung bestimmter Produkte zum jeweiligen Produktionsbereich auswirken.

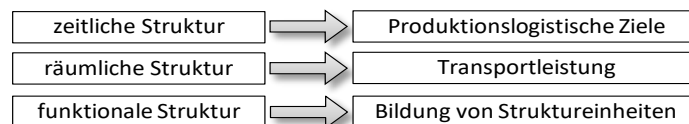


Abbildung C-1: Erweiterung des Robustheitsfokus auf die Strukturebenen

Anhang D: Entfernungsmatrizen des Belastungsszenarios

Tabelle D-1: Entfernungsmatrizen des Belastungsszenarios

(Verrichtungsprinzip)
Entfernungen [m]

	Wareneingang	Zuschnitt	Drehen	Planfräsen	Bohren	Räumen	Verzahnungsfräsen	Entgraten	Schleifen	Walzschälen	Warenausgang
Wareneingang		5,15	16,29	36,83					31,95		
Zuschnitt			14,25								
Drehen				22,90		28,29	12,23		15,66		
Planfräsen					18,03						29,54
Bohren							28,75				
Räumen						16,09					
Verzahnungsfräsen							14,36				
Entgraten											15,57
Schleifen									8,93	16,51	
Walzschälen											8,40
Warenausgang											

(Gegenstandsprinzip)
Entfernungen [m]

	Wareneingang	Zuschnitt	Drehen	Planfräsen	Bohren	Räumen	Verzahnungsfräsen	Entgraten	Schleifen	Walzschälen	Warenausgang
Wareneingang		15,04	11,79	20,20					25,32		
Zuschnitt			12,41								
Drehen				12,04		13,69	19,03		21,90		
Planfräsen					14,37						30,23
Bohren							15,82				
Räumen						20,90					
Verzahnungsfräsen							15,99				
Entgraten											15,57
Schleifen									14,27	19,42	
Walzschälen											8,40
Warenausgang											

Anhang E: Kenngrößen des Belastungsszenarios

Tabelle E-1: Berechnung minimaler Bestand bei Vollausslastung

Lose pro Jahr	Produkte	Zuschnitt	Drehen	Planfräsen	Bohren	Räumen	Verzahnungsfräsen	Entgraten	Schleifen	Walzschälen	ZAU _p	
160	A-100			22,80	120,50			9,50			152,80	
60	A-200			20,20	20,50			25,10			65,80	
96	3x-T		62,90	25,30							88,20	
60	ZK 54	5,20	50,40						40,20		95,80	
60	ET-5		40,30			10,30	40,40	15,10	20,20	35,30	161,60	
60	ET-6		50,40				20,40	15,10	20,30		106,20	
60	ET-7		50,40			15,30	40,40	15,10	15,20	50,50	186,90	
80	ZK 58	7,60	45,40						19,10		72,10	
		ZAUm	82,26	113,62	116,66	129,07	174,25	151,57	139,20	121,24	174,25	
		ZAUv	0,19	0,14	0,09	0,71	0,20	0,28	0,32	0,38	0,18	
		# BM	1	7	3	7	1	2	2	3	2	Bmin
		Bmin	85,1	810,3	352,9	1358,0	180,9	326,8	306,2	417,0	359,4	4196,6

B_m [h] 4390,84
Bestandsgrad 104,63%

Tabelle E-2: Berechnung minimale Durchlaufzeit

Produktname	A-200	ET-5	ET-7	ZK 58	A-100	3x-T	ZK 54	ET-6
Losgröße [Stück/Los]	600	600	600	450	225	375	600	600
Losanzahl [Lose/a]	60	60	60	80	160	96	60	60
Technologie	Belegungszeit [h/Los]							
Zuschnitt				7,6			5,2	
Drehen		40,3	50,4	45,4		62,9	50,4	50,4
Planfräsen	20,2				22,8	25,3		
Bohren	20,5				120,5			
Räumen		10,3	15,3					
Verzahnungsfräsen		40,4	40,4					20,4
Entgraten	25,1	15,1	15,1		9,5			15,1
Härten		80	80					80
Schleifen		20,2	15,2	19,1			40,2	20,3
Walzschälen		35,3	50,5					

DLZ_{min,p}

Summe ZAU_i [h/Los] 65,8 241,6 266,9 72,1 152,8 88,2 95,8 186,2

DLZ _{min} [h]	141,61
DLZ _{min} [BKT]	8,85

DLZ_{mg} [BKT] 12,09

Flussgrad	136,60%
-----------	---------

Tabelle E-3: Berechnung maximale Leistung

Technologie	Teil-Nr.	Z _L [Lose/a]	t _r [min/Los]	X _L [Stck/Los]	t _e [min/Stck]	T _K [h/a]	A [d/a]	h [min/S]	h _{zmax}	S [S/d]	T _E [h/a]	BM _L [Stck]	BM _S [Stck]	Ausl. [%]	Kapa _{max}	L _{max}
Zuschnitt	4	60	15	600	0,5	315,0	248	480	0,82	1	1627	0,19				
Zuschnitt	8	80	8	450	1	610,7	248	480	0,82	1	1627	0,38				
S						926						0,57	1	57%	8	4,55
Drehen	3	96	22	375	10	6035,2	248	480	0,92	2	3651	1,65				
Drehen	4	60	25	600	5	3025,0	248	480	0,92	2	3651	0,83				
Drehen	5	60	18	600	4	2418,0	248	480	0,92	2	3651	0,66				
Drehen	6	60	25	600	5	3025,0	248	480	0,92	2	3651	0,83				
Drehen	7	60	25	600	5	3025,0	248	480	0,92	2	3651	0,83				
Drehen	8	80	25	450	6	3633,3	248	480	0,92	2	3651	1,00				
S						21162						5,80	7	83%	112	92,75
Räumen	5	60	17	600	1	617,0	248	480	0,86	1	1706	0,36				
Räumen	7	60	20	600	1,5	920,0	248	480	0,86	1	1706	0,54				
S						1537						0,90	1	90%	8	7,21
Verzahnungsfräsen	5	60	24	600	4	2424,0	248	480	0,89	2	3532	0,69				
Verzahnungsfräsen	6	60	24	600	2	1224,0	248	480	0,89	2	3532	0,35				
Verzahnungsfräsen	7	60	24	600	4	2424,0	248	480	0,89	2	3532	0,69				
S						6072						1,72	2	86%	32	27,51
Planfräsen	1	160	16	225	6	3642,7	248	480	0,9	2	3571	1,02				
Planfräsen	2	60	12	600	2	1212,0	248	480	0,9	2	3571	0,34				
Planfräsen	3	96	20	375	4	2432,0	248	480	0,9	2	3571	0,68				
S						7287						2,04	3	68%	48	32,65
Bohren	1	160	28	225	32	19274,7	248	480	0,88	2	3492	5,52				
Bohren	2	60	30	600	2	1230,0	248	480	0,88	2	3492	0,35				
S						20505						5,87	7	84%	112	93,95
Entgraten	1	160	8	225	2,5	1521,3	248	480	1,0	2	3968	0,38				
Entgraten	2	60	8	600	2,5	1508,0	248	480	1,0	2	3968	0,38				
Entgraten	5	60	5	600	1,5	905,0	248	480	1,0	2	3968	0,23				
Entgraten	6	60	5	600	1,5	905,0	248	480	1,0	2	3968	0,23				
Entgraten	7	60	5	600	1,5	905,0	248	480	1,0	2	3968	0,23				
S						5744						1,45	2	72%	32	23,16
Schleifen	4	60	15	600	4	2415,0	248	480	0,92	2	3651	0,66				
Schleifen	5	60	15	600	1,5	915,0	248	480	0,92	2	3651	0,25				
Schleifen	6	60	17	600	2	1217,0	248	480	0,92	2	3651	0,33				
Schleifen	7	60	15	600	1,5	915,0	248	480	0,92	2	3651	0,25				
Schleifen	8	80	24	450	3,5	2132,0	248	480	0,92	2	3651	0,58				
S						7594						2,08	3	69%	48	33,28
Walzschälen	5	60	18	600	3,5	2118,0	248	480	0,9	2	3571	0,59				
Walzschälen	7	60	30	600	5	3030,0	248	480	0,9	2	3571	0,85				
S						5148						1,44	2	72%	32	23,06
Gesamtsumme												21,9	28	78%	432	338,13

L_m [h] 313,20
Auslastungsgrad 92,63%

Anhang F: Kenngrößen des Beanspruchungsszenarios

Tabelle F-1: Leistungskenngrößen aus den Simulationsdurchläufen

Gesamtleistung [h/a]	
mit Ausfall EXTERN	
Losgröße	0,25 Losgröße
77544,30	79898,10

Tabelle F-2: Empirische Ergebniswerte der Simulationsdurchläufe

	BKT	Losgröße	0,25 Losgröße
Beginn Betrachtungszeitrum	1	278,54	328,24
	2	308,41	325,37
	3	309,86	309,62
	4	381,51	312,98
	5	292,02	328,04
	6	314,93	313,18
	7	308,71	307,97
	8	303,32	328,04
	9	298,24	328,44
	10	314,93	316,05
	11	333,51	312,29
	12	334,64	328,44
	13	345,11	324,12
Störeignis	14	308,71	319,96
	15	320,03	297,11
	16	230,72	285,28
	17	189,25	250,59
	18	105,99	222,82
	19	58,18	207,84
	20	0,00	207,44
	21	0,00	204,08
	22	0,00	207,44
	23	0,00	211,95
	24	85,75	204,08
	25	132,62	204,08
	26	180,43	199,76
	27	294,39	211,75
	28	380,14	204,08
	29	321,25	207,44
	30	274,38	211,75
	31	272,01	211,75
	32	199,55	199,76
	33	168,26	204,08
	34	207,97	204,08
	35	295,91	223,02
	36	364,33	264,05
	37	385,46	293,50
	38	377,86	319,21
	39	414,69	325,37
	40	402,57	331,16
	41	318,88	327,24
	42	331,62	334,77
	43	399,77	336,94
	44	337,87	381,81
	45	322,40	379,77
	46	345,74	386,12
	47	318,18	387,59
	48	311,21	388,23
	49	310,06	385,56
	50	372,89	378,60

Anhang G: Exemplarische Kostenbewertung

Tabelle G-1: Bearbeitungs- und Rüstkosten

Simulationsergebnisse - urspr. Losgröße			
Bauteil	Lose	Rüstkosten	Bearbeitungskosten
A-100	56	1967,63	344865,44
A-200	21	699,74	39619,50
3x-T	33	1077,12	131422,50
ZK 54	21	746,76	79101,67
ET-5	21	1682,54	155382,33
ET-6	21	1276,44	90840,33
ET-7	21	2202,10	193294,50
ZK 58	28	1072,10	87145,50
Summe	220	3574,81	373890,59

Simulationsergebnisse - 1/4 Losgröße			
Bauteil	Lose	Rüstkosten	Bearbeitungskosten
A-100	222	7846,96	343832,91
A-200	81	2787,48	39457,13
3x-T	133	4319,36	131754,38
ZK 54	83	2999,07	79420,63
ET-5	83	6730,17	155382,33
ET-6	82	5044,01	89741,46
ET-7	84	8738,47	191760,42
ZK 58	111	4327,64	87942,56
Summe	877	14264,38	373097,27

Tabelle G-2: Lagerkosten

Belastungsszenario - Gegenstandsprinzip [Reihenstruktur]								
Simulationsergebnisse			Lagerkostensatz			15,50%		
Bauteil	Lose	Teile je Los	ZAUp [h/Los]	K _F [€/Stck]	K _M [€/Stck]	Stückkosten	Lagerkosten [€/Stück]	
A-100	167	225	152,8	27,53	10,94	38,47	3,83	
A-200	61	600	65,8	3,25	3,50	6,75	0,79	
3x-T	99	375	88,2	10,62	5,93	16,55	1,74	
ZK 54	62	600	95,8	6,38	1,04	7,42	0,66	
ET-5	62	600	241,6	12,53	0,10	12,63	0,99	
ET-6	62	600	186,2	7,33	1,20	8,53	0,75	
ET-7	63	600	266,9	15,34	4,47	19,81	1,88	
ZK 58	82	450	72,1	7,09	2,40	9,49	0,92	
gew. Mittel [h/Los]			142,03	gew. Mittel [€/Stück]			1,45	
				gew. Mittel [€/Los]			656,37	
B_m [h]			4390,84					
B_m [Los]			30,92	Lagerkosten [€]				
				20292,19				

Belastungsszenario - 1/4 Losgröße								
Simulationsergebnisse			Lagerkostensatz			15,50%		
Bauteil	Lose	Teile je Los	ZAUp [h/Los]	K _F [€/Stck]	K _M [€/Stck]	Stückkosten	Lagerkosten [€/Stück]	
A-100	666	56	38,37	27,53	10,94	38,47	3,83	
A-200	243	150	13,33	3,25	3,50	6,75	0,79	
3x-T	397	94	22,58	10,62	5,93	16,55	1,74	
ZK 54	249	150	24,67	6,38	1,04	7,42	0,66	
ET-5	248	150	120,37	12,53	0,10	12,63	0,99	
ET-6	245	150	108,93	7,33	1,20	8,53	0,75	
ET-7	250	150	126,98	15,34	4,47	19,81	1,88	
ZK 58	331	113	21,58	7,09	2,40	9,49	0,92	
gew. Mittel [h/Los]			52,99	gew. Mittel [€/Stück]			1,45	
				gew. Mittel [€/Los]			163,83	
B_m [h]			5419,83					
B_m [Los]			102,27	Lagerkosten [€]				
				16754,68				