

Eine Methodik
zum dynamischen Life Cycle Controlling
von Produktionssystemen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Wirt. Ing. Jörg Niemann
aus Münster (Westf.)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Tag der Einreichung: 11.04.2006

Tag der mündlichen Prüfung: 04.06.2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Jörg Niemann

Eine Methodik
zum dynamischen
Life Cycle Controlling von
Produktionssystemen

Nr. 459

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Jörg Niemann

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-13-8, ISBN (13) 978-3-939890-13-3

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2007.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort des Autors

„Eine Investition in Wissen
bringt immer noch die besten Zinsen“

Benjamin Franklin (1706-1790)

Dieses Zitat erinnert mich in zweierlei Hinsicht an die Erstellung dieser Arbeit. Zum einen beschreibt es in prägnanter Weise meine Motivation, durch die Entwicklung eines wissensbasierten Reglers den wirtschaftlichen Nutzen von Produktionssystemen zu optimieren. Auf der anderen Seite drückt es aber auch das Vertrauen zahlreicher Personen aus, die in mich „investiert“ und damit den Erfolg dieser Arbeit maßgeblich unterstützt haben.

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart entstanden. Dank gebührt an erster Stelle meinem Doktorvater Prof. Westkämper für die fachliche und nachhaltige Betreuung, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Spath danke ich für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Mitberichtes.

Besonders verpflichtet bin ich Herrn Dr.-Ing. Alexander Schloske und meinem langjährigen Kollegen Dr.-Ing. Markus Stolz für die fachliche Begleitung der Arbeit, die konstruktiven Diskussionen sowie für die kritischen Anmerkungen und Anregungen. Ich danke weiterhin meinen Kollegen Dr.-Ing. Lamine Jendoubi sowie Dr.-Ing. Bernhard Gottwald für die kontinuierliche motivierende Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Besondere Anerkennung gilt meiner langjährigen Hiwine Frau Magistra Stefanie Maute für die Ausdauer und die Mühe bei der Erstellung von unzähligen Graphiken sowie für die langjährige Motivation bei der Fertigstellung der Arbeit. Frau Magistra Verena Buttler danke ich für ihre Unterstützung bei der Prüfungs- und Druckvorbereitung.

Die praktische Anwendung und Validierung der Methodik erfolgte im Rahmen eines Industrieprojektes. Für die innerbetriebliche Unterstützung bei der Umsetzung möchte ich mich bei Herrn Seidler und Herrn Däuber von der Firma FLEX-Elektrowerkzeuge GmbH herzlich bedanken.

Die kollegiale Atmosphäre am IFF und Fraunhofer IPA werde ich immer in angenehmer Erinnerung behalten. Für die schöne Zeit danke ich allen Kolleginnen und Kollegen.

Ganz besonders verbunden bin ich meiner Freundin Gülnur für ihr Verständnis, ihre Geduld sowie ihre persönliche und fachliche Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Zu alledem wäre es nicht gekommen, hätten meine lieben Eltern mich nicht während meiner Ausbildung bis zum heutigen Tag mit allen Kräften unterstützt und mir diesen Weg ermöglicht. Sie haben unermüdlich in mein Wissen investiert, Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Stuttgart, im Juni 2007

Jörg Niemann

I Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	16
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	16
1.2	Zielsetzung und Aufgabenstellung	18
1.3	Vorgehensweise.....	21
2	GRUNDLAGEN ZUR GESTALTUNG VON PRODUKTIONSSYSTEMEN.....	23
2.1	Definition des Produktionsbegriffs	24
2.2	Gestaltungsansätze von Produktionssystemen	25
2.2.1	Organisatorische Ansätze	25
2.2.2	Ressourcenorientierte Ansätze	30
2.2.3	Zwischenfazit zu den Gestaltungsansätzen	32
2.3	Dynamische Systemveränderungen in Produktionssystemen	32
2.3.1	Betriebliche Informationssysteme	33
2.3.2	Lernen und Verbesserung	36
2.3.3	Arbeitsplanung in Produktionssystemen	39
2.3.4	Wirkung von Systemveränderungen	40
2.3.5	Zwischenfazit zu den dynamischen Systemveränderungen	42
2.4	Wirtschaftlichkeitsrechnung in Produktionssystemen	42
2.4.1	Verfahren der Kosten- und Leistungsrechnung.....	43
2.4.2	Verfahren zur Investitionsrechnung	49
2.4.3	Lebenslauforientierte Bewertungsansätze	51
2.4.4	Simulationsgestützte Kostenanalyse	53
2.4.5	Zwischenfazit zur Wirtschaftlichkeitsrechnung in Produktionssystemen.....	56
2.5	Zusammenfassung der Grundlagen zur Produktionssystemgestaltung	57
3	REFERENZMODELL FÜR PRODUKTIONSSYSTEME.....	60
3.1	Modellierung der Leistungseinheiten	63
3.1.1	Selbstähnliche Systemstrukturen.....	65
3.1.2	Hierarchischer Systemaufbau	65
3.2	Modellierung der Auftragsinformationen.....	71

4	LIFE CYCLE CONTROLLING VON PRODUKTIONSSYSTEMEN	75
4.1	Auflösung der Fertigungsaufträge	76
4.2	Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen	80
4.2.1	Auswahl kritischer und potentialbehafteter Kapazitätspakete	80
4.2.2	Ableitung von Handlungsstrategien	83
4.3	Simulation von alternativen Produktionsszenarien	88
4.4	Bewertung geeigneter Handlungsstrategien	89
4.5	Auswahl und Umsetzung konkreter Maßnahmen	92
4.6	Betriebsdaten zur Systemüberwachung.....	93
4.7	Dynamischer Regelkreis des Life Cycle Controlling	94
5	VERIFIKATION DER METHODIK AM FALLBEISPIEL	98
5.1	Darstellung des Unternehmens.....	98
5.2	Kennzahlen des Produktionssystems.....	99
5.3	Simulationsbasierte Planung in der Produktion	100
5.4	Aufbau und Struktur des Produktionssystems.....	101
5.5	Anwendung der Methodik auf das Produktionssystem	102
5.5.1	Auflösung der Fertigungsaufträge	103
5.5.2	Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen	104
5.5.3	Simulation von alternativen Produktionsszenarien	107
5.5.4	Bewertung geeigneter Handlungsstrategien	108
5.5.5	Auswahl und Umsetzung konkreter Maßnahmen	110
5.5.6	Betriebsdaten zur Systemüberwachung.....	110
5.6	Abschließende Bewertung der eingesetzten Methodik	111
6	ZUSAMMENFASSUNG	113
7	LITERATURVERZEICHNIS	120

II Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Anpassung des Produktionssystems an das Produktspektrum	17
Abb. 1-2:	Regelkreis zur Systemoptimierung	19
Abb. 1-3:	Vorgehensweise in der Arbeit	22
Abb. 2-1:	Untersuchungsbereich für die Planung von Produktionssystemen	24
Abb. 2-2:	Struktur des Stuttgarter Unternehmensmodells	27
Abb. 2-3:	Grundmodell einer Leistungseinheit	28
Abb. 2-4:	Gliederung der Produktionsressourcen in Produktionssystemen	31
Abb. 2-5:	Stellung des Produktionssystems innerhalb der Auftragsabwicklung	34
Abb. 2-6:	Aufgaben und Einsatzgebiete der BDE.....	35
Abb. 2-7:	Kostenwirkung durch industrielles Lernen	37
Abb. 2-8:	Auslöser von Erfahrungseffekten.....	38
Abb. 2-9:	Systematisierung der Ursache und Wirkungszusammenhänge.....	41
Abb. 2-10:	Schema der Kostengliederung.....	44
Abb. 2-11:	Messung des Systemnutzens über die Gesamtanlageneffektivität.....	47
Abb. 2-12:	Untersuchung von Trade-offs über die Zeit	52
Abb. 2-13:	Einordnung der Simulationstechnologien in die Planungsebenen	54
Abb. 3-1:	Systemelemente des Referenzsystems	60
Abb. 3-2:	Grundlagen der Klassendiagramme in UML	62
Abb. 3-3:	Leistungseinheit mit Attributen und Funktionen	63
Abb. 3-4:	Das Stuttgarter Unternehmensmodell als selbstähnliche Leistungseinheiten	65
Abb. 3-5:	Hierarchische Sicht der Referenzstruktur für ein Produktionssystem	66
Abb. 3-6:	Struktur der Auftragsinformationen.....	72
Abb. 4-1:	Regler zum Life Cycle Controlling.....	75
Abb. 4-2:	Auflösung der Fertigungsaufträge in Kapazitätspakete	77
Abb. 4-3:	Darstellung der erforderlichen Betriebsmittelkapazitäten.....	78
Abb. 4-4:	Zeitliche Gliederung der erforderlichen Gesamtkapazität	79
Abb. 4-5:	Auswahl kritischer und potentialbehafteter Arbeitspakete	82
Abb. 4-6:	Beispiel für strategische Handlungsoptionen über den Planungszeitraum	84
Abb. 4-7:	Ergebnisse der Simulation	88
Abb. 4-8:	Evaluation von Migrationsalternativen.....	91

Abb. 4-9:	Entwicklung der kumulierten Stückkosten	91
Abb. 4-10:	Nachkalkulation und Prognosekorrektur.....	93
Abb. 4-11:	Synchronisation des Produktlebenszyklus mit dem Systemlebenslauf.....	95
Abb. 4-12:	Regelkreis zum Life Cycle Controlling	96
Abb. 5-1:	Transformation des Produktionssystems in die Simulationsumgebung.....	101
Abb. 5-2:	Struktureller Aufbau des Produktionssystems	102
Abb. 5-3:	Bildung der Kapazitätspakete	104
Abb. 5-4:	Strategie zur Kapazitätsanpassung für Kapazitätspaket 2.....	105
Abb. 5-5:	Übersicht über das Gesamtpaket von Verbesserungsmaßnahmen.....	106
Abb. 5-6:	Darstellung der Simulationsergebnisse	107
Abb. 5-7:	Amortisationsrechnung zur Bestimmung der Pay-back Period	109
Abb. 5-8:	Erreichte Einsparungen im Vergleich zu empirischen Erfahrungskurven	109
Abb. 5-9:	Methodenerfolg im Vergleich zu empirischen Erfahrungskurven.....	111

III Formelzeichen und Einheiten

Größe	Einheit	Bezeichnung
β	%	Anteil der organisatorisch bedingten Wartezeit mit Personalanwesenheit
η_{Leistung}	%	Leistungsgrad
η_{Nutzung}	%	Nutzungsgrad
$\eta_{\text{Qualität}}$	%	Qualitätsgrad
a	€/Stück	Stückkosten der ersten Produktionseinheit
b	---	Degressionsfaktor ($b < 0$)
FL	m ²	Flächenbedarf Ressource
i	---	Laufvariable Anzahl der Betriebsmittel
I	Zeiteinheiten	Planbeschäftigung
j	---	Laufvariable Anzahl des Personals
K_{Anlage}	€	Anschaffungswert
K_L	€/Stunde	Qualifikationsabhängiger Lohnsatz
K_P	€	Lohnkosten/Gehälter des Personals
K_{PZ}	€	Kosten über den Planungszeitraum
$K_{R,h}$	€/Zeiteinheit	Ressourcenkostensatz
K_{RA}	€/Zeiteinheit	Ressourcenkosten Abschreibung
K_{RE}	€	Energiekosten
K_{RFGM}	€/Stunde	Restfertigungsgemeinkosten
K_{RI}	€/Zeiteinheit	Instandhaltungskosten
$k_{RI,t}$	%	Instandhaltungssatz
K_{RR}	€	Ressourcenkosten Raum
K_{RZ}	€	Ressourcenkosten Zinsen
$K_{\text{Sys},h}$	€/Zeiteinheit	Systemfertigungskostensatz
L	Anzahl	Anzahl der Lose
LR	---	Lernrate
m	---	Anzahl der Werkstücke

Größe	Einheit	Bezeichnung
n_{Ref}	---	Referenzproduktspektrum
p	%	Zinsen
p_v	%	Technische Verlustzeiten
PZ	Zeiteinheiten	Planungszeitraum
RW	€	Restwert
SK_{PZ}	€/Stück	Stückkosten im Planungszeitraum
T	Zeiteinheiten	Auftragszeit
t	Zeiteinheiten	Zeitintervall
t_a	Zeiteinheiten	Ausführungszeit
T_B	Zeiteinheiten	Belegungszeit
t_e	Zeiteinheiten	Einzelbearbeitungszeit am Werkstück
T_{LV}	Zeiteinheiten	Leistungsverlustzeiten
t_n	Zeiteinheiten	Anzahl der Nutzungsperioden
T_N	Zeiteinheiten	Maschinennutzungszeit
$t_{n\ Rest}$	Zeiteinheiten	(Kalkulierte) Restnutzungsdauer
$T_{Nettobearbeitung}$	Zeiteinheiten	Nettobearbeitungszeit
$T_{Nettobetrieb}$	Zeiteinheiten	Nettobetriebszeit
T_O	Zeiteinheiten	Organisatorische Ausfallzeit
T_P	Zeiteinheiten	Einsatzzeit des Personals
T_{Prod}	Zeiteinheiten	Produktivzeit
T_Q	Zeiteinheiten	Qualitätsbedingte Verlustzeiten
t_r	Zeiteinheiten	Rüstzeit
T_{Still}	Zeiteinheiten	(ungeplante) Stillstandszeit
T_{TV}	Zeiteinheiten	Technische Verlustzeit (= $T_Q + T_{LV}$)
x	---	Anzahl der Produktionseinheiten
y	€/Stück	Stückkosten der kumulierten Stückzahl x

IV Abkürzungsverzeichnis

AV	Arbeitsvorbereitung
BAB	Betriebsabrechnungsbogen
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
ERP	Enterprise Resource Planning
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution Systems
MTM	Methods-Time Measurement (Methodenzeit-Messung)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
PDE	Personaldatenerfassung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QDE	Qualitätsdatenerfassung
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SFB	Sonderforschungsbereich
TPM	Total Productive Maintenance

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Produzierende Unternehmen im Bereich der variantenreichen Serienfertigung operieren heute auf Märkten, deren Verhalten durch eine starke Dynamik und Turbulenz charakterisiert ist. [SPA03], [WES04e]. Dabei stellen insbesondere die sich wandelnden Kundenanforderungen Unternehmen vor die Herausforderung, qualitativ hochwertige Produkte und Varianten bei immer kürzeren Innovationszyklen zu fertigen und auf den Markt zu bringen. [WES04d]

Nach Berechnungen des Statistischen Bundesamtes wurden in Deutschland im Jahr 2004 technische Investitionsgüter im Neuwert von 10,9 Billionen Euro in der industriellen Produktion eingesetzt. [STA04] Im Bereich der Serienfertigung werden diese Investitionen zumeist mit direktem Bezug auf die zu fertigenden Produkte getätigt. Dies bedeutet, dass sich die Wirtschaftlichkeitsrechnung einer Anlageninvestition an der geplanten Absatzkurve der gefertigten Produkte orientiert. Der erwartete Lebenszyklus (Marktzyklus) der Produkte über den Zeitverlauf bestimmt somit entscheidend die Art und Höhe dieser Investitionen.

Die marktseitigen Wandlungstreiber haben für produzierende Unternehmen jedoch zur Folge, dass die zukünftigen Auftragseingänge mit einer zunehmenden Planungsunsicherheit bezüglich der Art (Produktmix) und Anzahl der zu fertigenden Produkte behaftet sind.

Die grundlegenden Leistungsziele in einem Unternehmen sind durch das „magische Dreieck“ aus Kostenreduktion, Zeitreduzierung und der Qualitätsverbesserung definiert. [WES06] Serienfertiger unterliegen dabei einem hohen Kostendruck, so dass sich die Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme in der Regel durch das Niveau der Stückkosten ausdrückt. Die Leistungsziele der Zeitreduzierung und Qualitätsverbesserung müssen sich dieser Maßgröße unterordnen und dementsprechend in stückkostenbezogene Kennwerte überführt werden. Die Unternehmen stehen daher vor der permanenten Herausforderung, die Fertigung von Produkteinheiten unter den geringst möglichen Stückkosten durchzuführen, um im Wettbewerb bestehen zu können.

Für eine wirtschaftliche Nutzung der betrieblichen Produktionssysteme ergibt sich daraus das Problem, den externen Wandlungsdruck durch kontinuierliche interne Anpassungen auffangen

zu müssen. [WES03] Als Produktionssystem wird in diesem Zusammenhang eine selbstständige Einheit verstanden, in der alle erforderlichen Ressourcen für die Produkterstellung zusammengeführt sind. [WES06]

Zum Zeitpunkt der Produkt- bzw. Produktionsplanung liegen zumeist nur für einen begrenzten Zeithorizont genaue Plandaten vor. Erst im weiteren Zeitverlauf entsteht Planungssicherheit über die zukünftigen Auftragsmengen und deren Zusammensetzung. Daher sind die bislang einmalig, d.h. zu Beginn des Investitionsvorhabens durchgeführten Planungen mit einer großen Unsicherheit behaftet. Die Systemkonfiguration muss vielmehr mit zunehmendem Wissen über den weiteren Geschäftsverlauf in kontinuierlichen Abständen angepasst und optimiert werden. In Abb. 1-1 ist diese Problemstellung graphisch dargestellt.

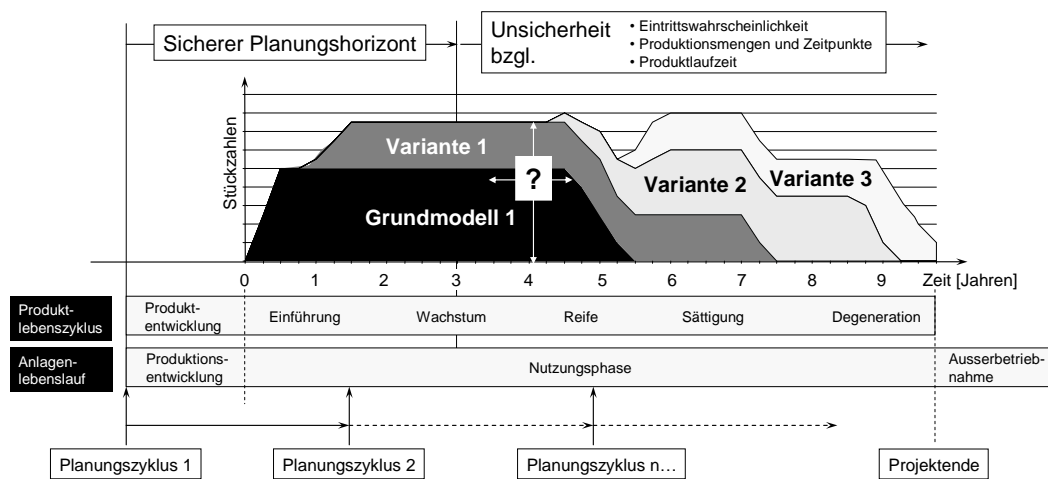


Abb. 1-1: Kontinuierliche Anpassung des Produktionssystems an das Produktspektrum

Zudem bedingt der technische Fortschritt ständig Innovationen, die sich in neuen Anlagen mit höheren Leistungen oder gesteigerten Leistungsumfängen niederschlagen. Daher sind insbesondere bei kapitalintensiven Investitionsgütern kontinuierliche Anpassungen an die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Veränderungstreiber notwendig, um eine optimale Anlagenausnutzung über die Systemlebensdauer zu erzielen. [SPA03]

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, die kontinuierliche Optimierung von Produktionssystemen über deren Lebenslauf im Bereich der Serienfertigung zu unterstützen. Dazu soll eine Methodik zum lebenslauforientierten Controlling von Produktionssystemen entwickelt werden, mit der die Stückkosten in Abhängigkeit der geforderten Ausbringungsmenge optimiert werden können. Mit der Methodik müssen die Auswirkungen der zentralen Wandlungstreiber auf das Produktionssystem identifiziert und systematische Regelungsmechanismen für eine angepasste Systemrekonfiguration entwickelt werden. Der Begriff der Rekonfiguration bezeichnet in diesem Zusammenhang nach *Spath* [SPA06] und *Heisel* [HEI06] die „schnelle, zielgerechte und wirtschaftliche Systemanpassung [eines Produktionssystems] bezüglich der Technologie, Funktion und Kapazität“. Die Anpassungen erfolgen als Reaktion auf Veränderungen des Marktes, wobei der Begriff der Rekonfiguration auch Systemveränderungen außerhalb eines vorhandenen Flexibilitätskorridors einschließt. [REH04]

Dies erfordert ein Verfahren, mit dem Produktionssysteme kontinuierlich über den Lebensweg geplant, optimiert und evaluiert werden können. Die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems ist dabei durch das aktuelle Niveau der Fertigungskosten auszudrücken. Leistungssteigerungen stellen somit eine Erhöhung des Systemnutzens dar, zu dessen Beurteilung als Maßgröße die zu erwartende Entwicklung der Stückkosten über den weiteren Systemlebenslauf herangezogen werden soll. Das zu entwickelnde Regelmodell muss die Identifikation geeigneter Maßnahmen erlauben, mit denen ein Absinken bzw. eine Optimierung der Stückkosten über die Zeit erreicht werden kann. Dieses Regelmodell wird im Folgenden als „Life Cycle Controlling“ bezeichnet. Das Controlling beinhaltet hierzu in Anlehnung an *Bullinger* [BUL03], *Perridon* [PER04] und *Steinle* [STE03] sowohl systemgestaltende als auch systemüberwachende Funktionen.

Das Controlling wird damit als Zielvorgabe und Ergebniskontrolle verstanden, jedoch soll in Erweiterung bestehender Definitionen insbesondere die vorausschauende Handlungsbeeinflussung im Sinne einer kontinuierlichen Systemoptimierung im Zentrum der Betrachtung stehen.

Für kontinuierliche Planungs- und Optimierungsaufgaben von komplexen Systemzusammenhängen werden heute in der Industrie zunehmend simulationsbasierte Werkzeuge eingesetzt. Daher wird die zu entwickelnde Methodik an eine Simulationsumgebung angebunden, in der

die Wirkzusammenhänge des Produktionssystems modelliert und bewertet werden können. In Abb. 1-2 ist der geplante Regelkreis für das Gesamtsystem skizziert.

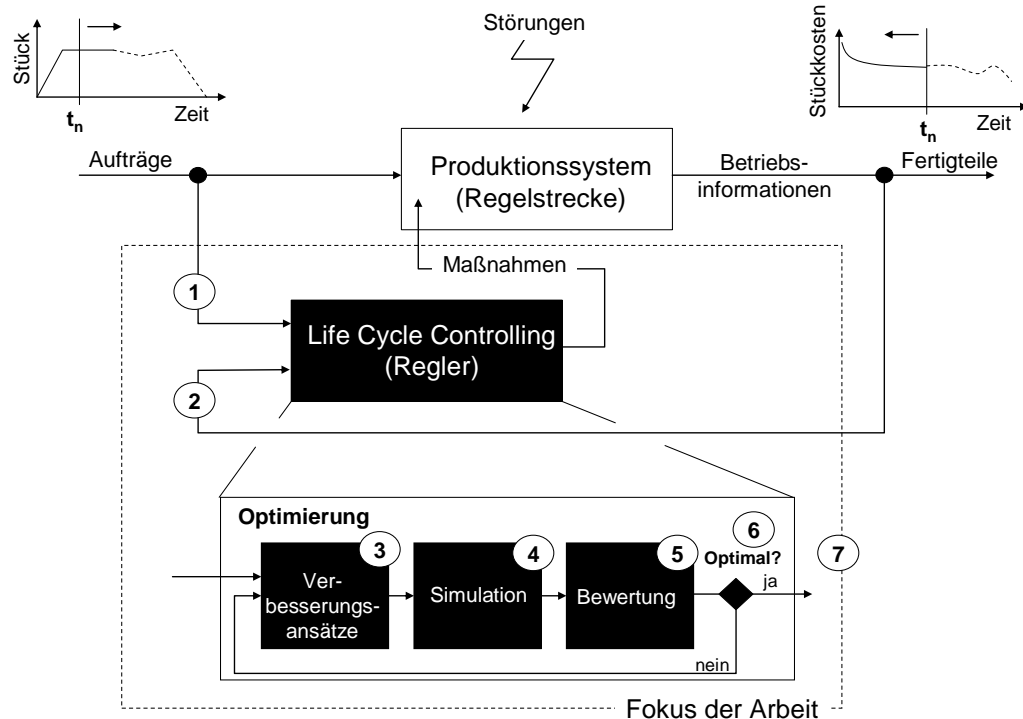


Abb. 1-2: Regelkreis zur Systemoptimierung

Als inhaltliche Aufgabenstellung ergibt sich daraus die Entwicklung eines Reglers zum Life Cycle Controlling, mit der die Regelstrecke Produktionssystem über die Stellgröße der Stückkosten in Abhängigkeit der geforderten Ausbringungsmenge eingestellt werden kann.

Hierzu sind verschiedene Partialmodelle zu entwickeln, die in der Methodik zusammengeführt werden müssen. Um dieses Ziel zu erreichen müssen durch den Regelmechanismus dann folgende Teilfunktionen (vgl. Nummerierung in Abb. 1-2) geleistet werden, aus denen sich gleichzeitig die Teilbereiche der Aufgabenstellung der Arbeit ableiten:

1. Auflösung der Kundenaufträge

Der Regler muss die geplanten Kundenaufträge als Eingangsgröße aufnehmen und in die erforderliche Sollkapazität der Regelstrecke umrechnen. Als Aufgabenstellung ist hierzu ein Verfahren zu entwickeln, mit dem das geplante Produktionsprogramm in Arbeitspakete mit definierten Kapazitätsbedarfen je Fertigungsressource aufgelöst werden kann, um etwaige Minderauslastungen oder Engpässe zu identifizieren.

2. Integration von Betriebsdaten

Der Regler muss als weitere Eingangsgröße Betriebsdaten aus dem realen Systembetrieb aufnehmen und verarbeiten. Hierzu muss ein allgemeines Referenzmodell zur Abbildung der Regelstrecke generiert und hinterlegt werden. Im Modell müssen dazu einerseits die unterschiedlichen Ressourcen des Produktionssystems abgebildet und in ihren Wirkzusammenhängen beschrieben werden können. Andererseits müssen auch diejenigen Betriebsinformationen identifiziert werden, die zur Überwachung und dynamischen Darstellung der Systemleistung erforderlich sind. Weiterhin ist darzustellen, wie diese Informationen in den Regler eingehen und verarbeitet werden.

3. Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen

Der Regler muss Maßnahmen identifizieren, mit denen Verbesserungen bezüglich der Systemleistung erreicht werden können. Im Rahmen der Arbeit ist daher darzustellen, wie aus den Betriebsinformationen systematisch Ansätze für Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden, mit denen das Produktionssystem in seiner Struktur verändert und optimiert werden kann. Dazu ist eine formale Vorgehensweise zu entwickeln, mit der wirkungsvolle Maßnahmen identifiziert und deren Auswirkungen auf die Regelstrecke beschrieben werden können. Hierbei ist auch die zeitliche Fristigkeit der Maßnahmen zu berücksichtigen.

4. Simulation von Szenarien

Der Regler muss die Optimierungsmaßnahmen ex-ante in einer simulationsbasierten Umgebung auf ihre Wirksamkeit untersuchen. Dazu sind Anforderungen an geeignete Simulationswerkzeuge für derartige Planungssysteme zu identifizieren. Zudem sind die erforderlichen Eingangs- und Ausgangsgrößen der Simulation zu spezifizieren und deren Integration in die Methodik zu beschreiben.

5. Kostenorientierte Darstellung und Bewertung von Szenarien

Der Regler muss eine Bewertung der Simulationsszenarien hinsichtlich der zu erwartenden Stückkosten bereitstellen. Um dies zu leisten, ist im Sinne der Aufgabenstellung ein kostenorientiertes Bewertungssystem zu entwickeln, mit dem die Auswirkungen von Investitionen in alternativen Produktionsszenarien und Systemkonfigurationen dargestellt werden können.

6. Auswahl und Umsetzung geeigneter Szenarien

Der Regler muss eine Entscheidungsunterstützung bereitstellen, ob und welche Maßnahmen bzw. Investitionsalternativen hinsichtlich des Optimierungskriteriums umgesetzt werden sollten. Dazu müssen die prognostizierten Stückkosten aus den virtuellen Produktionsszenarien dem Stückkostenniveau gegenübergestellt werden, auf dem das Produktionssystem aktuell operiert. Die Methodik muss dann eine Bewertung und Auswahl möglicher Alternativen unter der Berücksichtigung der zu diesem Zeitpunkt bekannten zukünftigen Produktionsvolumina ermöglichen.

7. Bereitstellung einer dynamischen Systemregelung

Der Regler muss aus den Ausgangsgrößen Maßnahmen für Strukturanpassungen bereitstellen und auslösen. Der Regler stellt daher keine Eingangsgrößen für die Regelstrecke bereit, sondern zielt auf die Optimierung der inneren Systemstrukturen in Abhängigkeit der Veränderungstreiber ab. Um die Auswirkungen durch externe Störungen sowie veränderte Eingangsgrößen möglichst frühzeitig zu erfassen und über den Regelungsmechanismus aufzufangen, sind kontinuierliche Planungszyklen erforderlich. Dazu muss die Methodik eine durchgängige Fortschreibung der Systemkonfiguration über die Zeit ermöglichen, so dass auf diese Weise ein dynamischer Ansatz zur kontinuierlichen Systemevolution entsteht.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst müssen dazu in Kapitel 2 die Grundlagen bezüglich der Planung von Produktionssystemen dargestellt und analysiert werden. Mit der Analyse sollen bereits vorhandene Ansätze und Technologien zur Systemplanung erfasst und auf mögliche Defizite in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit hin untersucht werden. Da der kostenorientierten Sichtweise eine besondere Bedeutung zukommt, müssen auch Aspekte der Investitions- und Kostenplanung in diesem Kapitel Berücksichtigung finden. Im Anschluss daran kann in Kapitel 3 eine tiefer gehende Analyse und Beschreibung der Regelstrecke selbst erfolgen. Dazu soll ein Referenzmodell für ein Produktionssystem eines Serienfertigers aufgebaut und hinsichtlich der eingesetzten Ressourcen formal beschrieben werden. Die formale Ressourcenbeschreibung muss dabei den Anforderungen an eine dynamische Kostenbewertung Rechnung tragen. Das Referenzmodell dient im weiteren Fortgang der Arbeit als Basis, auf der die zu erstellende Metho-

dik für das Life Cycle Controlling für Produktionssysteme in Kapitel 4 aufbaut. In Kapitel 5 soll dann die Evaluation der entwickelten Methodik anhand eines industriellen Fallbeispiels erfolgen. Dazu soll die erstellte Methodik für die Optimierung eines Produktionssystems in der industriellen Serienfertigung eingesetzt und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden.

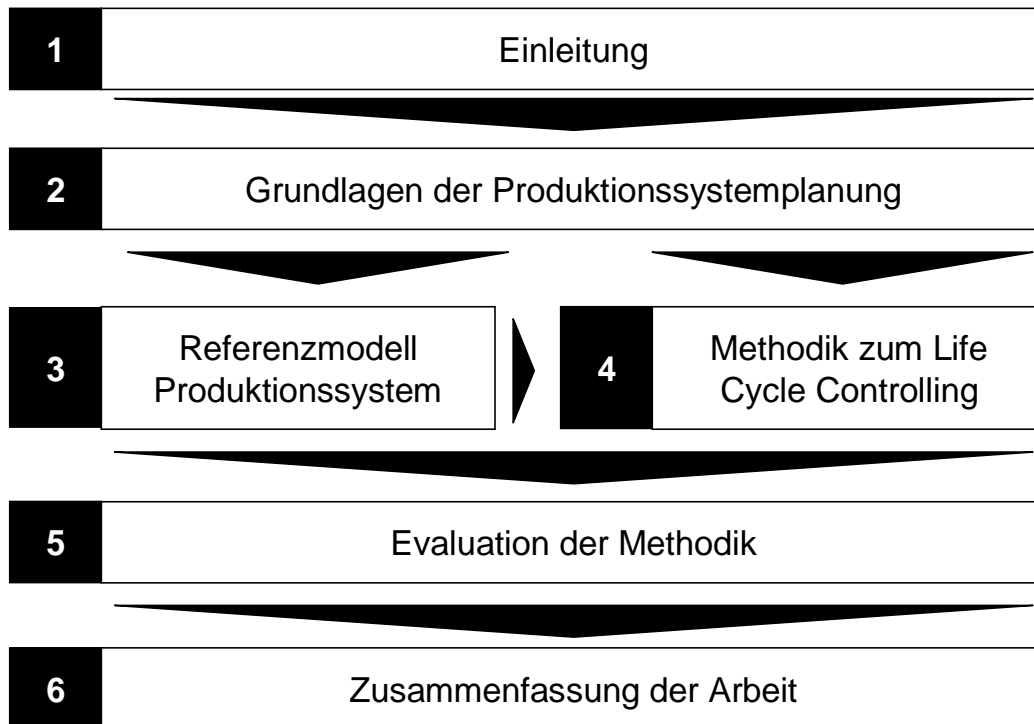


Abb. 1-3: Vorgehensweise in der Arbeit

In Kapitel 6 sollen dann die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten dargestellt werden. Abb. 1-3 zeigt die Vorgehensweise zur Lösung der Problemstellung noch einmal zusammenfassend in einer Übersicht.

2 Grundlagen zur Gestaltung von Produktionssystemen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit bestehenden Ansätzen zur Gestaltung von Produktionssystemen, die im Folgenden auf ihre Verwendung hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit untersucht werden müssen.

Nach *Eversheim* [EVE99b] können Produktionssysteme generell durch organisatorische, technisch-technologische sowie wirtschaftlichkeitsorientierte Merkmale charakterisiert werden. Diese unterschiedlichen Bereiche stellen jedoch nur statische Sichten auf das Produktionssystem dar. Um der in der Aufgabenstellung formulierten lebenslauforientierten, d.h. langfristig angelegten Systemoptimierung gerecht zu werden, ist nach *Westkämper* [WES06] zudem eine Betrachtung der dynamischen Effekte erforderlich, die permanent auf das System einwirken. Daher müssen zusätzlich zu den dargestellten statischen Bereichen auch die Veränderungstreiber untersucht werden, die eine dynamische Evolution des Produktionssystems über den Lebenslauf bewirken.

In Kapitel 2.1 (Definition des Produktionsbegriffs) soll dazu zunächst der Begriff der Produktion definiert und abgegrenzt werden.

Darauf aufbauend befasst sich Kapitel 2.2 (Gestaltungsansätze von Produktionssystemen) mit der statischen Betrachtung von organisatorischen und ressourcenorientierten Gestaltungsansätzen von Produktionssystemen.

Im Hinblick auf die Lebenslauforientierung müssen im Kapitel 2.3 (Dynamische Systemveränderungen) die dynamischen Effekte untersucht werden, die als Veränderungstreiber auf das Produktionssystem während der Betriebsphase einwirken.

Dabei muss auch untersucht werden, wie Produktionssysteme in die generelle Auftragsabwicklung und die betrieblichen Informationssysteme eingebunden sind.

Für die kostentechnische Systemabgrenzung und als Grundlage für eine dynamische Kostenbewertung über den Systemlebenslauf werden in Kapitel 2.4 (Wirtschaftlichkeitsrechnung in Produktionssystemen) die grundlegenden Verfahren der Investitions- und Kostenrechnung in der Serienfertigung analysiert und hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Einsatzfähigkeit für die spätere Methodik untersucht.

Gemäß der Aufgabenstellung müssen dazu auch bestehende simulationsbasierte Ansätze zur Kostenanalyse gesichtet und auf ihre Verwendbarkeit in der Methodik hin überprüft werden.

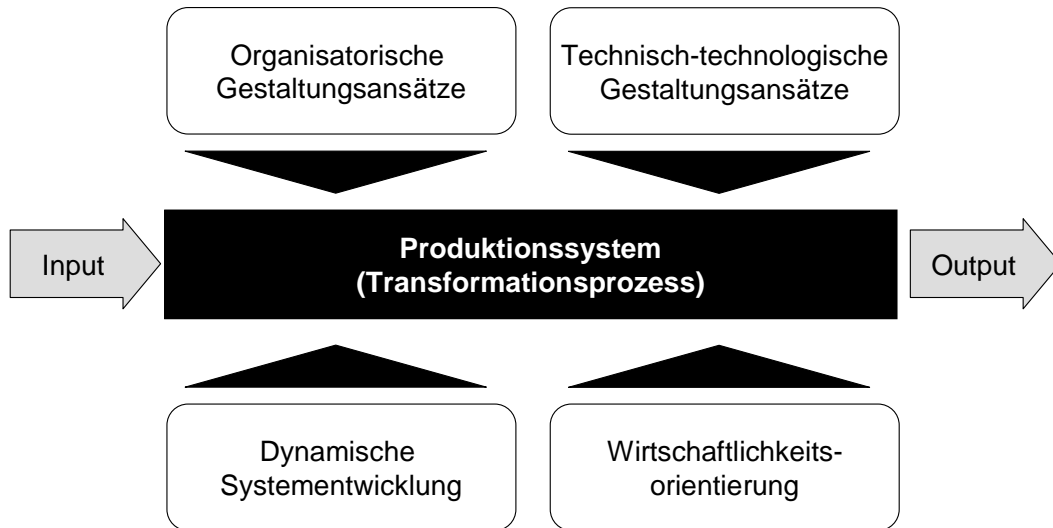


Abb. 2-1: Relevanter Untersuchungsbereich für die Planung von Produktionssystemen
 Der insgesamt resultierende Untersuchungsbereich zur Gestaltung von Produktionssystemen ist zusammenfassend noch einmal in Abb. 2-1 dargestellt.

2.1 Definition des Produktionsbegriffs

Der Begriff „Produktion“ kennzeichnet die „Gesamtheit wirtschaftlicher, technologischer und organisatorischer Maßnahmen, die unmittelbar mit der Be- und Verarbeitung von Stoffen zusammenhängen“. [WES06] Dabei umschließt der Produktionsbegriff nach *Westkämper* [WES04b] mehr als den der Fertigung, da er neben der reinen fertigungstechnischen Leistungserstellung auch alle damit verbundenen „steuernden und organisatorischen Funktionen [...] von der Entwicklung bis zur Auslieferung eines Produktes an den Kunden“ beinhaltet. In dieser weit gefassten Definition werden neben der Fertigung auch z.B. die Bereiche der Konstruktion und des Vertriebs zur Produktion gezählt. Die Systemgrenze des Produktionssystems beinhaltet demnach sowohl die dispositiven als auch die operativen Einheiten, die am Produktionsprozess des betrachteten Systems beteiligt sind. [DOH01], [WES06]

2.2 Gestaltungsansätze von Produktionssystemen

Basierend auf der Definition für Produktionssysteme soll nun die Untersuchung von Gestaltungsansätzen zur Systemstruktur von Produktionssystemen erfolgen. Die zu untersuchenden Ansätze lassen sich hierfür in organisatorische und ressourcenorientierte Ansätze zur Gestaltung von Produktionssystemen untergliedern.

2.2.1 Organisatorische Ansätze

Die organisatorische Struktur von Produktionssystemen kann nach *Westkämper* [WES06] grundsätzlich in die Aufbauorganisation und die Ablauforganisation unterschieden werden. Während die Aufbauorganisation die Strukturierung der einzelnen Verantwortungsbereiche beschreibt, befasst sich die Ablauforganisation mit dem Zusammenwirken der einzelnen Prozesse innerhalb der Systeme. Daher wird die organisatorische Systemstruktur insgesamt durch das integrative Zusammenwirken der beiden Bereiche bestimmt.

Die Fabrikorganisation konzentriert sich heute auf eine wandlungsfähige Gestaltung der Systeme, um die sich permanent ändernden Aufgaben und Abläufe innerhalb der Produktion beherrschen zu können. Die hierzu bekannten Ansätze lassen sich grundlegend in

- organische Ansätze [WAR93]
- systemtechnische Ansätze [WES04e] und
- methodenorientierte Ansätze [KOR04], [SPA03] klassifizieren.

Da bei diesen Ansätzen insbesondere die potentielle Veränderlichkeit der Strukturen im Vordergrund steht, spielen sie für die in der Aufgabenstellung postulierte lebenslauforientierte Systemadaption eine besondere Rolle und werden daher im Folgenden vertiefend untersucht.

2.2.1.1 Organische Gestaltungsansätze

In den Neunzigerjahren haben sich als Reaktion auf die sich rasch verändernden Umgebungsbedingungen Systemstrukturen entwickelt, die sich durch eine Robustheit gegenüber den Turbulenzen auszeichnen. In Anlehnung an Vorbilder aus der Natur wurden dazu die komplexen Systemstrukturen der Fabrik in einzelne „Organe“ gegliedert, die als autonome Einheiten flexibel für die Bearbeitung von wechselnden Aufgabenstellungen eingesetzt werden können.

Die Einheiten sind von einem zentralen Informationssystem überlagert, das in seiner Spitze die strategische Zielausrichtung in Abstimmung mit den anderen Organen (Einheiten) vorgibt. Die Konzepte vom „Fraktalen Unternehmen“ [WAR93] bzw. von der „Modularen Fabrik“ [WIL98] verstehen sich dazu als Vertreter von Ansätzen, mit denen eine kundennahe, flexible Produktion durch die Bildung von Fertigungssegmenten erreicht werden soll.

Fertigungssegmente stellen in diesem Zusammenhang produkt- und marktorientierte Einheiten („Organe“) einer Organisation dar, die sich durch eine weitgehende Autonomie und Verantwortung für Kosten, Termine und Qualität auszeichnen. Die Fertigungssegmente sind durch eine Prozesskettenorientierung, ausgeprägte Kunden-Lieferanten Beziehungen, sowie eine ganzheitliche Vorgangsbearbeitung und Selbstorganisation gekennzeichnet. Die Segmentierung erfolgt dabei nach der Art der technologischen Bearbeitungsprofile, wobei fertigungstechnisch ähnliche Teile zu Teilefamilien zusammengefasst werden. Das gemeinsame Ziel dieser Ansätze ist es, die Fertigungsbereiche in autonome, selbstregelnde Leistungseinheiten zu gliedern, in denen ein Produkt oder eine Teilefamilie komplett hergestellt werden kann. [BAL01], [COR00], [GAU02]

2.2.1.2 Systemtechnische Gestaltungsansätze

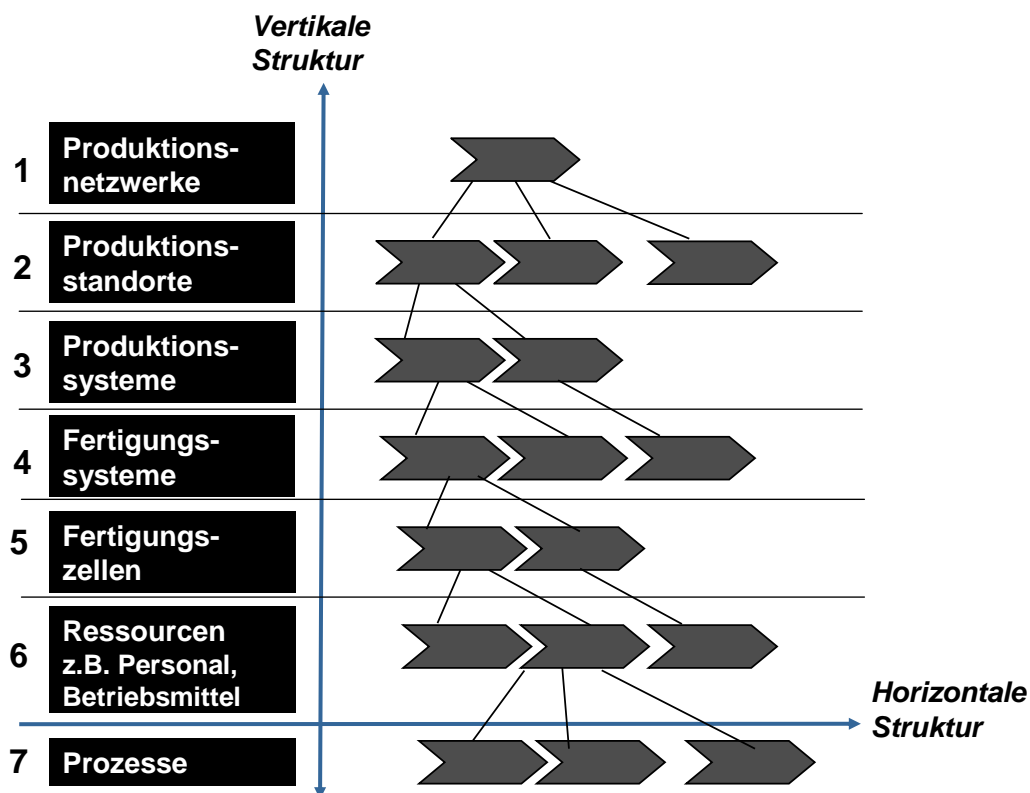
Als problematisch bei den organischen Gestaltungsansätzen hat sich jedoch im Laufe der Zeit die organisatorische Abstimmung der inneren und äußeren Schnittstellen der Einheiten erwiesen. Um dieses Problem zu beherrschen, wurde im Rahmen des SFB 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ der Universität Stuttgart das sog. „Stuttgarter Unternehmensmodell“ entwickelt. [WES06]

Westkämper et al. [WES04d], [WES06] bauen auf dem Ansatz der Fertigungssegmentierung nach technologischen, produkt- oder funktionsorientierten Kriterien auf, jedoch wurde in dem Modell ein systemtechnischer, hierarchischer Strukturierungsansatz hinterlegt.

Ein System ist nach DIN 19226 definiert als die „Anordnung von Gebilden, d.h. Elementen, die aufeinander durch Relationen einwirken und die innerhalb einer Hüllfläche, der Systemgrenze, aufeinander einwirken“ [DIN19226]. Die Systeme bestehen demnach aus Elementen, die ihrerseits wiederum als eigenständige Subsysteme aufgefasst werden können. [DOH01] Auf diese Weise kann ein komplexes Ordnungssystem aus Systemen und Subsystemen entstehen, deren Elemente zueinander durch Relationen strukturiert sind. Die Relationen können aus

Material-, Informations- oder Energieflüssen bestehen oder sich in Lagebeziehungen oder Wirkzusammenhängen ausdrücken. [DAE99], [SMT02]

In Analogie zu dieser Definition wurde im Rahmen des Stuttgarter Unternehmensmodells eine hierarchische Gliederung von Fabrikstrukturen in verschiedene Subsysteme vorgenommen. (vgl. Abb. 2-2)



Strukturelle Gliederung von Fertigungsegmenten

Abb. 2-2: Struktur des Stuttgarter Unternehmensmodells (verändert nach [WES06])

Die durch die Gliederung entstehenden Systeme werden als „Leistungseinheiten“ bezeichnet. Diese sind für die autonome Leistungserstellung in ihrem Bereich verantwortlich und besitzen dazu im Gegensatz zu den fraktalen Ansätzen eine eigene Führung (Management).

Durch die horizontale Verknüpfung von Leistungseinheiten ergeben sich so z.B. Prozessketten für die Auftragsabwicklung. Durch die vertikale Vernetzung der Einheiten können komplexe Netzwerkstrukturen abgebildet werden. Die dargestellten Merkmale der Leistungseinheit lassen sich direkt auf die in Kapitel 1 formulierte Problemstellung für Produktionssysteme in der Serienfertigung anwenden. Die Leistungseinheit Produktionssystem ist demnach mit den folgenden Merkmalen ausgestattet:

Zielvorgabe, Kooperation

Die Produktionssysteme werden mit Zielvorgaben in Form von Aufträgen belegt, die innerhalb der Leistungseinheit (dem Produktionssystem) eigenverantwortlich und möglichst effizient abgearbeitet werden müssen. Im Rahmen der gesamten Leistungserstellung kooperiert das Produktionssystem dann in Form von Kunden-Lieferantenbeziehungen mit anderen Einheiten.

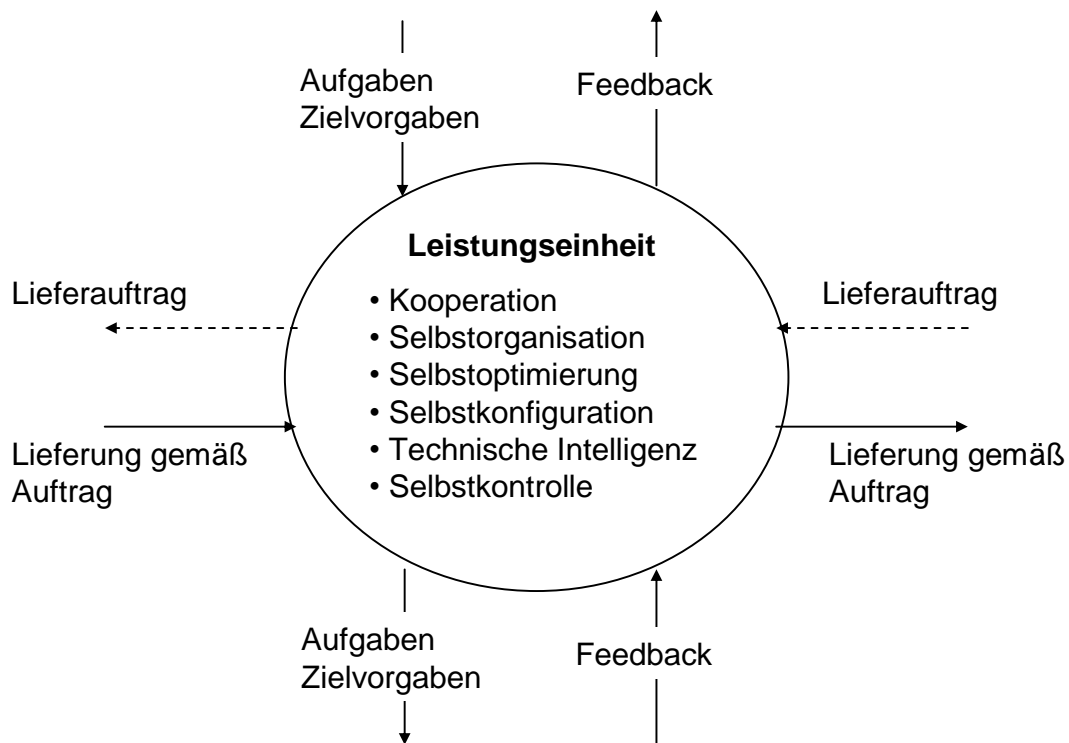


Abb. 2-3: Grundmodell einer Leistungseinheit (in Anlehnung an [WES06])

Selbstorganisation, Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration und technische Intelligenz

Innerhalb des Systems wird die Leistungserstellung selbstständig organisiert und koordiniert. Durch ständige Verbesserungsmaßnahmen müssen die Abläufe in sich optimiert werden. Dazu ist ein zentrales Management innerhalb der Leistungseinheit notwendig, mit dem die Ablauforganisation gesteuert werden kann. Die effiziente Auftragsbearbeitung erfordert weiterhin eine kostenoptimale Systemkonfiguration, die durch ein geeignetes inneres Systemmanagement und technische Systeme kontinuierlich überwacht werden muss.

Selbstkontrolle

Zur Überwachung der Leistungserstellung und der Wirkung von Optimierungsmaßnahmen ist eine permanente Kontrolle zur Erreichung der Ziele erforderlich. Für den in dieser Arbeit betrachteten Bereich der Serienfertigung bedeutet dies die Implementierung eines kostenorientiertes Controllings, mit dem die Systemleistung permanent überwacht werden kann.

Das Grundmodell für eine Leistungseinheit ist dazu in Abb. 2-3 dargestellt. Die Analyse der systemtechnischen Gestaltungsansätze zeigt, dass mit dem Stuttgarter Unternehmensmodell die besondere Problematik von Produktionssystemen in der Serienfertigung modelltechnisch erfasst und abgebildet werden kann. Allerdings liefert das Modell nur eine grundsätzliche Beschreibung des strukturellen Aufbaus und der Eigenschaften der Systeme. Wie die beschriebenen Leistungsmerkmale innerhalb einer Leistungseinheit jedoch erreicht bzw. gewährleistet werden können, wird durch die formale Systemgliederung nicht dargelegt und muss daher im Rahmen der zu erstellenden Methodik noch erarbeitet werden.

2.2.1.3 Methodenorientierte Gestaltungsansätze

Eine weitere Möglichkeit zum Aufbau von Produktionssystemen stellen methodenorientierte Gestaltungsansätze dar. [MTM01a], [MTM01b] Die Verfahren beinhalten die Ansätze des Lean Managements und heben auf die Vermeidung von Ressourcenverschwendung ab. Dies soll durch die strikte Anwendung von standardisierten Produktionsprinzipien und definierten Methodenbaukästen in allen Bereichen des Unternehmens erreicht werden. [SPA03], [WIL04], [WIN02] Für die integrale Betrachtung der Fabrik als *eine* Systemeinheit wurde der Begriff des „ganzheitlichen Produktionssystems“ geprägt. [HIS02], [KOR04], [MTM01a] Durch dieses Produktionsverständnis wird nicht nur der Bereich der eigentlichen Fertigung adressiert, sondern der Begriff umschließt auch alle peripheren Bereiche der technischen und organisatorischen Prozessunterstützung. Daher werden bei diesem ganzheitlichen Ansatz neben der reinen Fertigung und der direkt unterstützenden Bereiche (Instandhaltung, Steuerung etc.) auch die Logistik, Arbeitsvorbereitung und die Qualitätssicherung in die methodische Optimierung mit einbezogen.

Somit wird ein ganzheitliches Produktionssystem als eine vernetzte Einheit aller am Produktionsprozess beteiligter Vorgänge und Elemente verstanden. Die Systemführung und (konti-

nuierliche) Systemverbesserung wird dabei durch robuste Prozesse, standardisierte Arbeitsabläufe sowie methodisch unterstützte kontinuierliche Lernprozesse gefördert. [HIS02], [KOR04], [SPA03], [WES04b] Die Steuerung und Systemführung wird durch die zentrale Vorgabe und Kontrolle von Kennzahlen gewährleistet, mit denen auch die Leistungsmessung erfolgt.

Eine umfassende Übersicht über die unterschiedlichen Ansätze zur Gestaltung von ganzheitlichen Produktionssystemen findet sich bei *Spath* [SPA03] sowie in [MTM01a], [MTM01b].

Die Untersuchungen von *Feggeler* und *Neuhaus* [FEG02] sowie *Baszenski* [BAS03] zeigen, dass die Systemgrenzen der ganzheitlichen Produktionssysteme in produzierenden Industrieunternehmen stets sehr ähnlich sind. Die Vorgaben bezüglich der standardisierten Gestaltungsprinzipien und der eingesetzten Methoden und Optimierungsansätze variieren jedoch in den jeweiligen Unternehmen.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass die methodenorientierten Gestaltungsprinzipien auf die Festlegung von internen Produktionsstandards fokussieren. Leistungssteigerungen sollen durch die Vorgabe von Kennzahlen und eine kontinuierliche Systemauditierung erreicht werden. Die einzelnen Methoden liefern grundlegende Hinweise, wie Leistungsverluste im System gemessen und ggf. abgestellt werden können. Der Gestaltungsansatz befasst sich jedoch nicht mit der Gestaltung des Systems und seiner Ressourcen selbst, sondern setzt an der effizienten Gestaltung des Systembetriebs und der damit zusammenhängenden betrieblichen Abläufe an.

2.2.2 Ressourcenorientierte Ansätze

Zur Erfüllung der Produktionsaufgabe sind nach ihrer Art und Anzahl verschiedene Produktionsressourcen erforderlich. *Eversheim* [EVE99a], [EVE99b], *Werner* [WER01] und *Westkämper* [WES06] haben dazu allgemeine Ansätze entwickelt, die auf eine ressourcenorientierte Gestaltung von Produktionssystemen abzielen.

Zur Leistungserstellung ist demnach der Einsatz von Kapital, Menschen, Material, Energie, Werkzeugen, Maschinen, Information und Wissen erforderlich. *Westkämper* [WES06] fasst die technischen Ressourcen unter dem Begriff der Betriebsmittel zusammen und bezeichnet damit neben den Maschinen und Werkzeugen auch Vorrichtungen sowie Mess- und Transportmittel.

Diese Ressourcen werden als Objekte (Entitäten) mit entsprechenden Eigenschaften aufgefasst, die für den Einsatz in digitalen Fabrikmodellen und Simulationen geeignet sind. Gemäß der *VDI-Richtlinie 3633* kann über modelltechnische Integration der Personal- und Betriebsmittelressourcen ein zumeist hinreichend großer Teil der reinen Fertigungskosten in der Serienfertigung erfasst und ausgewertet werden. [VDI3633-1], [VDI3633-7] Für die Funktion des kostenorientierten Reglermodells spielen aber auch Informationen bezüglich der Auftragsplanung sowie das produktionstechnische Wissen zur Optimierung des Produktionssystems eine hervorgehobene Rolle. Abb. 2-4 stellt die Gliederung der Produktionsressourcen noch einmal graphisch dar. Für die Gestaltung von Produktionssystemen in der Serienfertigung sind insbesondere die grau hinterlegten Felder von Interesse.

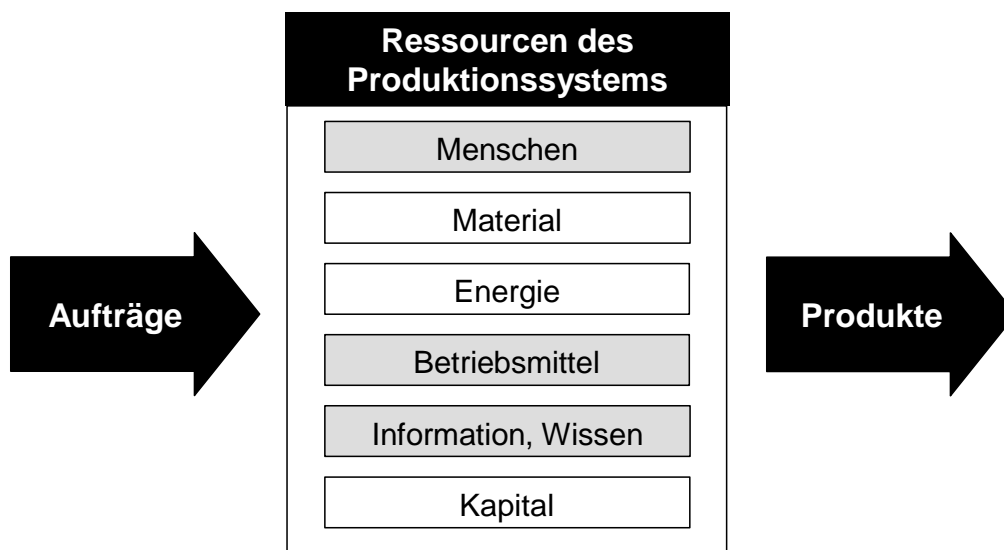


Abb. 2-4: Gliederung der Produktionsressourcen in Produktionssystemen

Die Ressource Material bzw. Materialbestand wird in diesem Zusammenhang als auftragsinduzierte Größe betrachtet, deren Optimierung außerhalb der Systemgrenze „Produktionssystem im Bereich des Einkaufs bzw. der Logistik erfolgt. Die Materialflusslogistik ist daher nicht Gegenstand dieser Arbeit. Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass mit dem ressourcenorientierten Ansatz die inneren Systemelemente von Produktionssystemen definiert und in ihrer Art klassifiziert werden können. Der Ansatz behandelt die Ressourcen jedoch nur als eigenständige Objekte. Eine Beschreibung der systembezogenen Wirkbeziehungen ist in diesem Gestaltungsansatz nicht vorgesehen.

2.2.3 Zwischenfazit zu den Gestaltungsansätzen

Zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und zur Beherrschung des Wandlungsdrucks unter turbulenten Marktbedingungen setzen Unternehmen heute auf die ganzheitliche Optimierung von Produktionssystemen. Es zeigte sich, dass die Systemgrenze Produktionssystem nicht nur ausführende, sondern auch unterstützende und planende Bereiche umschließt (vgl. Kapitel 2.1). Dies muss in der Gestaltung des Reglermodells berücksichtigt werden.

Moderne Produktionssysteme sind heute modular aufgebaut und werden als autonome, spezialisierte Einheiten (Segmentierung) betrieben. Zur Reduktion der inneren Komplexität und zur Beherrschung der Schnittstellen eignet sich die Strukturierung nach den Gesetzmäßigkeiten der Systemtechnik (vgl. Kapitel 2.2). Der Ansatz des Stuttgarter Unternehmensmodells kann dazu als Grundlage für den Aufbau eines Referenzmodells genutzt werden, um die Problematik von Produktionssystemen in der Serienfertigung geeignet abzubilden. Im Hinblick auf den geforderten Einsatz von Simulationswerkzeugen kann für die Erfassung der Systemelemente ein ressourcenorientierter Ansatz verfolgt werden.

Die in der Literatur bekannten Ansätze beziehen sich jedoch nur auf die statische Abbildung der Systemstruktur. Sie stellen damit eine Momentaufnahme der aktuellen Systemkonfiguration dar. Die Gestaltungsansätze sind daher zwar geeignet, mit Systemveränderungen umzugehen, jedoch leisten sie keine Abbildung der dynamischen Effekte und deren Auswirkungen über den Systemlebenslauf. Diese Aspekte sollen daher im folgenden Kapitel untersucht werden.

2.3 Dynamische Systemveränderungen in Produktionssystemen

Über den Lebenslauf wirken interne und externe Veränderungstreiber auf das Produktionssystem ein, die eine Systemadaption in Form von kontinuierlichen Planungs- und Reorganisationsprozessen erfordern. Um die Anforderungen an eine wirtschaftliche Produkterstellung permanent zu gewährleisten, müssen daher kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen innerhalb des Systems initiiert werden. [REH99], [SPA03], [WES04a], [WIL04] Analog dazu beschäftigen sich die folgenden Kapitel mit der Auslösung und Erfassung von dynamischen Systemveränderungen in Produktionssystemen. Dazu werden zunächst in Kapitel 2.3.1 (Betriebliche Informationssysteme) die bestehenden betrieblichen Informationssysteme der Planung, Überwachung und Kontrolle von Produktionssystemen analysiert. Kapitel 2.3.2

(Lernen und Verbesserung) beschäftigt sich mit den Auslösern für Veränderungsprozesse innerhalb der Produktion. In Kapitel 2.3.3 (Arbeitsplanung in Produktionssystemen) wird die Integration und Festschreibung von Systemänderungen im Produktionsprozess untersucht. In Kapitel 2.3.4 (Wirkung von Systemveränderungen) erfolgt dann abschließend die Analyse der Auswirkungen der Veränderungen innerhalb des Systems.

2.3.1 Betriebliche Informationssysteme

Für das Management der Produktionsprozesse sind Informationen bezüglich der Auftragsplanung, der aktuellen Systemleistung und der Ressourcen erforderlich. Hierzu werden im Bereich der Serienfertigung integrierte Systeme zum Auftragsmanagement und zum Produktionsmanagement eingesetzt. [BEC02]

Auftragsmanagementsysteme unterstützen hierbei die Prozesse der Produkt- und Auftragsplanung sowie der Auftragssteuerung. Die Systeme sind aus der klassischen PPS (Produktionsplanung und -steuerung) hervorgegangen. Ziel der PPS ist es, das „laufende Produktionsprogramm in regelmäßigen Abständen nach Art und Menge für mehrere Planungsperioden im Voraus zu planen und unter der Beachtung der gegebenen Ressourcen zu realisieren und zu überwachen“. [WIE99] Gemäß dem Aachener Modell deckt die PPS damit sowohl den langfristigen, aber auch den mittel- und kurzfristigen Planungshorizont ab. [BEC02]

Die Hauptaufgabe der langfristigen Planung ist die Festlegung des Produktionsprogramms. Dieses setzt sich aus den kommenden festen Kundenaufträgen, zusätzlichen internen Bestellungen und Vorratsaufträgen zusammen. Dieser Primärbedarf wird im Rahmen der mittelfristig orientierten Mengenplanung in die Sekundärbedarfe zur Eigenfertigung und Fremdvergabe aufgelöst. Für die Eigenfertigungsteile werden Fertigungsaufträge generiert, die dann im Rahmen der Feinplanung in das Produktionssystem eingelastet werden. [GUE03]

Die Auftragsveranlassung mit der detaillierten Zuweisung der Produktionsressourcen (Belegungsplanung) innerhalb des Produktionssystems sowie die kontinuierliche Überwachung des Auftragsfortschritts erfolgt durch die kurzfristige Produktionssteuerung. [SCH00] Der Prozess der Auftragsabwicklung ist dazu in Abb. 2-5 in Anlehnung an das Aachener PPS-Modell dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Fertigungsaufträge die Eingangsgröße für das Produktionssystem bilden. Die optimale Gestaltung des Produktionssystems muss sich daher nur mittelbar an dem

Produktionsprogramm orientieren, sondern vielmehr in direkter Abhängigkeit zu den generierten Fertigungsaufträgen erfolgen.

Die „klassischen PPS-Systeme“ sind heute weitgehend in sog. ERP-Systemen (Enterprise Resource Planning) aufgegangen, die ein vornehmlich betriebswirtschaftlich orientiertes Management des gesamten inner- und überbetrieblichen Supply-Chains zum Ziel haben. Sie verfügen neben den Anwendungen für die Produktionsprogrammplanung (Materialbedarfe, Termine) und der Steuerung von Fertigungsaufträgen durch das Produktionssystem auch über administrative Module. Dabei greifen die Systeme auf Daten des Vertriebs, der Personalplanung und auf die Kostenrechnung bzw. des Controllings zu. Ferner sind Kenndaten aus dem Anlagenmanagement (Qualitätsdaten, Instandhaltung) hinterlegt. [WES06].

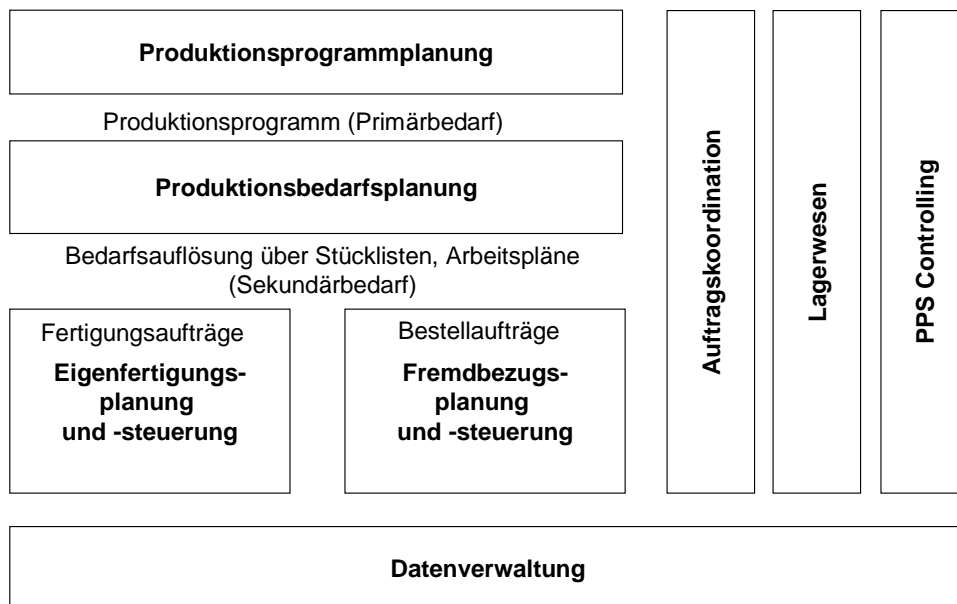


Abb. 2-5: Stellung des Produktionssystems innerhalb der Auftragsabwicklung (verändert nach [WIE99])

Auf der Ebene der fertigungsnahen Bereiche haben sich als Nachfolger der Leitstandskonzepte für die kurzfristige Steuerung sog. MES-Systeme (Manufacturing Execution Systems) etabliert, mit denen die Feinplanung bzw. Ausführungsplanung erfolgt. Die Systeme sind Bestandteil der Produktionssysteme und enthalten Planungs- und Prognosefunktionen. [WIE05] Die Ausführungen von Müller [MUE01] und die Studie von Mussbach-Winter [MUS03] zeigen, dass die bereits am Markt verfügbaren Applikationen technisch in der Lage sind, Daten bezüglich der Produktionsleistung sowie Informationen zur Ressourcennutzung über eine Rückmeldedatenerfassung bereitzustellen.

Die Grundlage hierfür bildet die Betriebsdatenerfassung, in der nach *Müller* und *Krämer* [MUE01] alle Maßnahmen subsumiert sind, um technische oder organisatorische Daten eines Produktes oder Dienstleistungsbetriebes in maschinell verarbeitungsfähiger Form bereitzustellen. Im Bereich der Serienfertigung liegt der Schwerpunkt der Datengenerierung in den Bereichen Maschinendatenerfassung (MDE), Personaldatenerfassung (PDE) und Qualitätsdatenerfassung (QDE). [EVE99b]

Die beispielhafte Übersicht in Abb. 2-6 zeigt, dass mit den heute verfügbaren Systemen Personal-, Auftrags-, Maschinenbelegungs-, Bewegungs- und Bestands-, sowie Qualitäts- und Instandhaltungsdaten erzeugt und verarbeitet werden können. [MUE01] Allerdings werden die Daten zumeist durch proprietäre Systeme an verschiedenen Stellen der Produktion generiert.

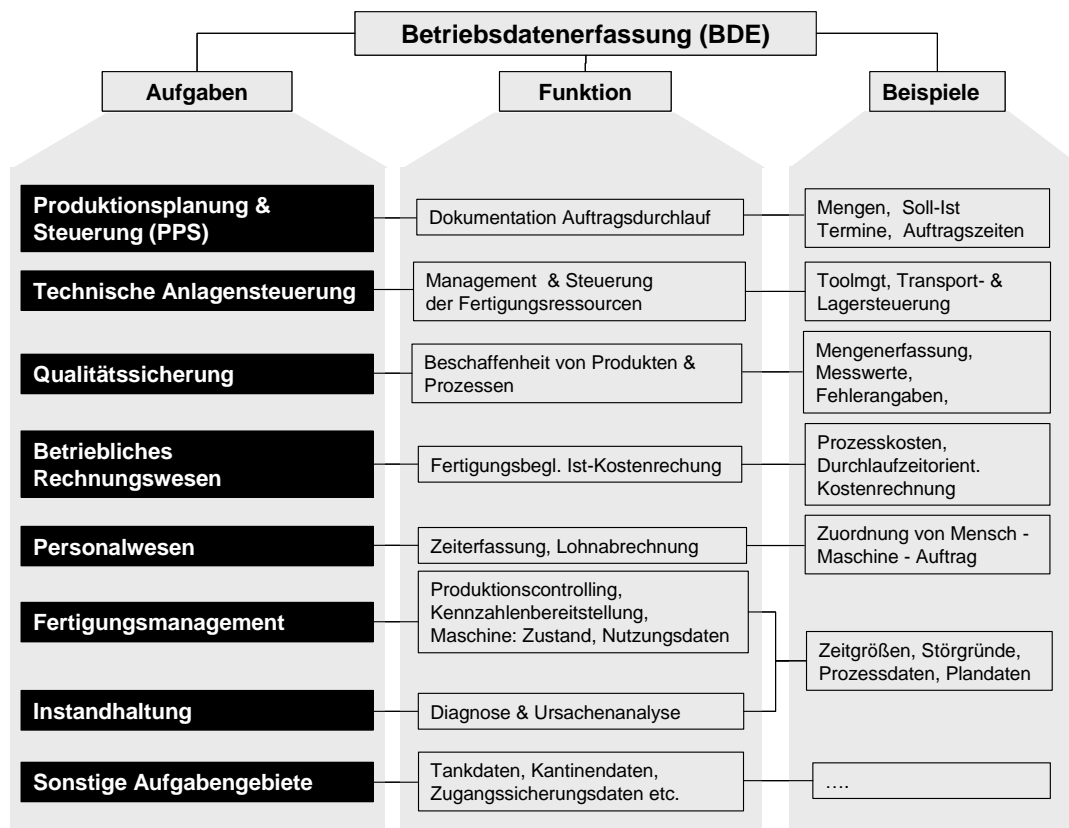


Abb. 2-6: Aufgaben und Einsatzgebiete der BDE (erweitert nach [MUE01])

Daher widmen sich bestehende Forschungsansätze der Entwicklung von Datenstrukturen, mit denen die Produktionsdaten aus den verschiedenen Bereichen zusammengeführt werden können. [DEL03], [HIE01], [THO03], [WIL03]

Die bestehenden Informationssysteme gehen stets von einem über die Zeit konstanten Produktionssystem aus, für das die Ressourcenbelegung erfolgt. Gemäß der Aufgabenstellung soll durch die zu entwickelnde Methodik jedoch genau umgekehrt das Produktionssystem optimal für die Abarbeitung der Produktionsaufträge eingestellt werden. Damit ist die Identifikation, Adressierung und Handhabung von Konfigurationsänderungen über den Lebenslauf in den bekannten Ansätzen bislang jedoch nicht realisiert. [KUR03], [NEU05], [ZMÜ05] Daher können die Funktionalitäten bzw. Daten dieser Systeme für die Methodik nur bis zum Zeitpunkt der (ressourcenneutralen) Bedarfsauflösung genutzt werden.

Aus der Betriebsdatenerfassung können über das MES die erforderlichen Rückmeldedaten zur Nachkalkulation gewonnen werden. Die technischen Lösungen zur Datenbereitstellung sind daher bereits vorhanden. Im Rahmen der Methodik müssen die benötigten Daten jedoch noch zu einem späteren Zeitpunkt in der Arbeit nach Art und Entstehungsort definiert werden. Zur Adressierung dynamischer Systemänderungen muss aufbauend auf den verfügbaren Daten aus den verschiedenen Informationssystemen ein weitergehender Planungsansatz entwickelt werden. Im Gegensatz zur Planungslogik bestehender PPS-Systeme muss die zu entwickelnde Methodik auf Basis der Kapazitätsplanung die stückkostenoptimale Systemkonfiguration als Ergebnis eines Planungslaufes liefern.

2.3.2 Lernen und Verbesserung

Änderungen der Systemkonfiguration können zum einen durch den externen Marktdruck erforderlich werden. Dazu wurden bereits in Kapitel 1.1 Änderungen in der Auftragsstruktur nach Art und Menge der nachgefragten Produkte identifiziert. Dies muss jedoch als eine nicht zu beeinflussende Größe hingenommen werden.

Andererseits können Systemanpassungen aber auch durch systeminterne Veränderungstreiber induziert werden. [WER01], [WIL04] Dabei entsteht in der Produktion über die Zeit durch die kumulierte Produktionsmenge ein Zuwachs an Erfahrung, der sich in einer zunehmend effizienteren Leistungserstellung niederschlägt. Diese sog. Lern- und Erfahrungskurven sind mittlerweile allgemein anerkannte Gesetzmäßigkeiten, die mit einer Senkung der Produktionskosten in Abhängigkeit von der gefertigten Stückzahl mathematisch beschrieben werden können. [WES03] Der Begriff „Lernen“ bezeichnet dabei die durch Beobachtung und Verarbeitung von gewonnenen Informationen entstandene zielgerichtete Verhaltensänderung. [ZWA03]

In Anlehnung an *Giesecke* [GIE01] und *Westkämper* [WES00b], [WES03] erfolgen industrielle Lernprozesse daher stets durch „tätige Anteilnahme“ oder „gezielte Eingriffe (Interventionen)“. Industrielle Lernprozesse stellen sich demnach nicht automatisch ein, sondern werden stets aktiv durch Maßnahmen ausgelöst.

Die Lernkurve stellt dann einen Graphen dar, der den Zusammenhang zwischen den direkten Fertigungsstückkosten (variable Kosten) und der kumulierten Produktionsmenge beschreibt. [BAU01], [HIB91] Lerneffekte, die dieser Lernkurve zugrunde liegen, beruhen auf Übungsgewinnen durch die Wiederholung von gleichartigen Arbeitsverrichtungen. [WÖH02] Umfassender als die Lernkurve beschreibt die von *Henderson* [HEN84] formulierte Erfahrungskurve einen Graphen, der die funktionale Abhängigkeit der Stückkosten in Abhängigkeit von der kumulierten Produktionsmenge (Produktionserfahrung) darstellt.

In Abb. 2-7 ist dazu der qualitative Verlauf der Erfahrungskurve über die Zeit dargestellt. Die Erfahrungskurve umschließt daher nicht nur die direkten Fertigungskosten, sondern erfasst die Produktionskosten zum „Vollkostensatz“ pro Stück. Es werden demnach auch Gemeinkosten aus Bereichen integriert, die nur indirekt mit der Produkterstellung befasst sind.

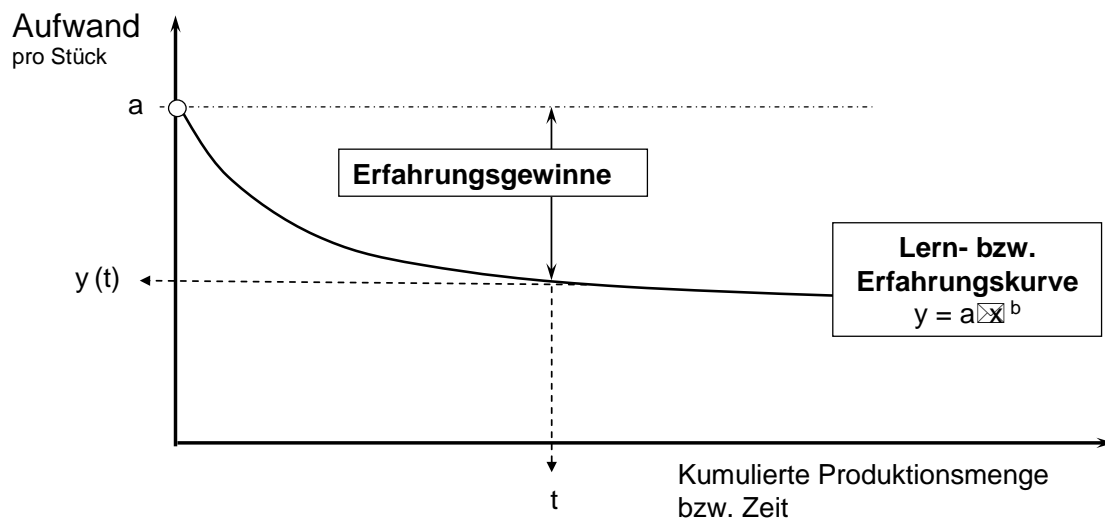


Abb. 2-7: Kostenwirkung durch industrielles Lernen

Somit ist die Erfahrungskurve im Gegensatz zur Lernkurve geeignet, ein breites Spektrum der relevanten Kostenarten in einem ganzheitlichen Produktionssystem zu erfassen und darzustellen. Unter den sog. Erfahrungskurveneffekten wird dann die Einsparung von Aufwand (Zeit, Kosten etc.) verstanden, der zur Herstellung einer Produkteinheit erforderlich ist. Dabei sinkt der Aufwand pro Stück (Stückkosten) in der generalisierten Form um einen konstanten Faktor

in Abhängigkeit der kumulierten Produktionsmenge bzw. der Zeit. Der Verlauf der Kurve kann allgemein mit der Formel $y = a x^b$ (mit $b < 0$) dargestellt werden. [WES03] Hierbei bezeichnet y die realen Stückkosten für letzte Einheit der kumulierten Produktionsmenge x . Der Faktor a stellt die Stückkosten für die erste Produkteinheit dar. Der Faktor b beschreibt mathematisch den Degressionsfaktor, der wiederum zur einfacheren Handhabung in die Lernrate umrechenbar ist. Die Lernrate LR je Verdopplung der Produktionseinheiten ergibt sich mathematisch durch die Umformung der Gleichung zu $LR = 2^b$. Eine Übersicht über die Bestandteile und Auslöser der Erfahrungskurveneffekte ist in Abb. 2-8 dargestellt.

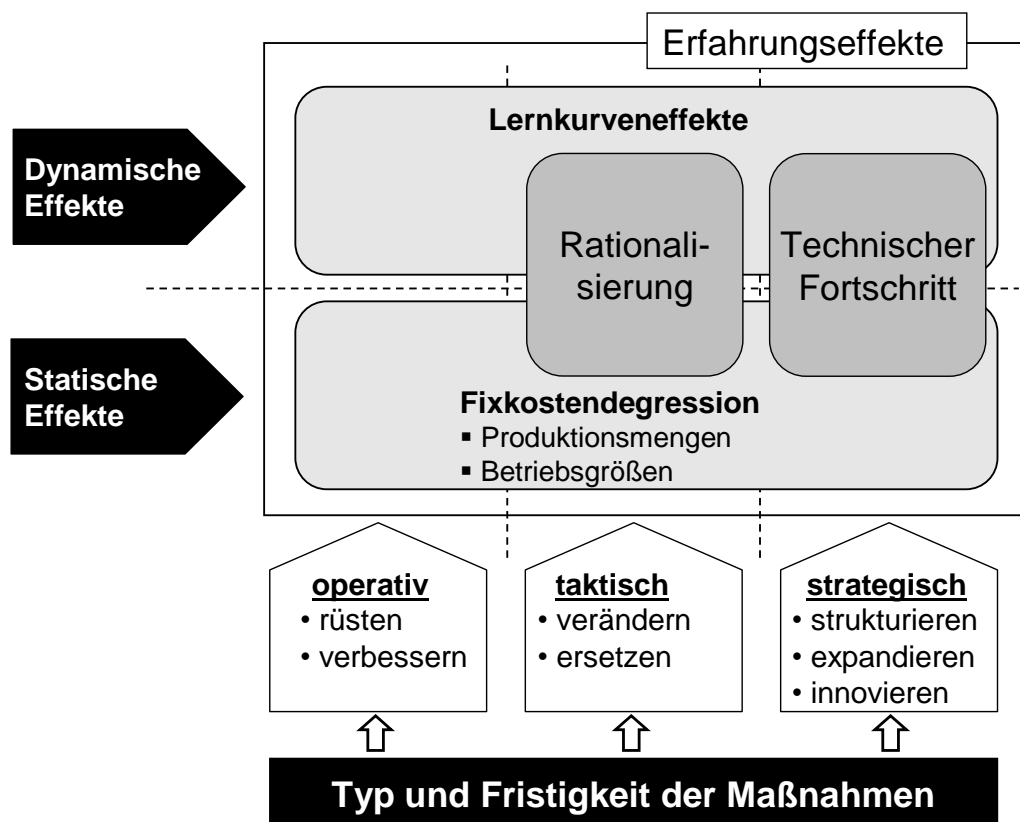


Abb. 2-8: Auslöser von Erfahrungseffekten

Die entstehenden Skaleneffekte können hierbei durch statische oder dynamische Faktoren induziert werden. Zu den dynamischen Effekten zählen der technische Fortschritt über die Zeit, sowie Rationalisierungs- und Lern- bzw. Übungseffekte. Die statischen Effekte lassen sich in die Fixkostendegression (economies of scale) oder den Betriebsgrößeneffekt (economies of scope) klassifizieren. Die Skaleneffekte entstehen hier durch die bessere Kapazitätsauslastung bzw. durch die verbesserte Bündelung (Allokation) von Unternehmensressourcen.

[COE03], [JUN03] Die Effekte werden durch Verbesserungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Wirkhorizonten innerhalb des Produktionssystems realisiert. Zur methodischen Unterstützung der Ideenfindung für geeignete Maßnahmen eignen sich intuitiv-kreative sowie systematisch-analytische Verfahren. [EVE03], [GRO03]

Intuitiv-kreative Verfahren basieren auf dem „trial and error“ Verfahren, bei dem so lange unterschiedliche Lösungsansätze getestet werden, bis ein hinreichend gutes Ergebnis gefunden ist. Stellvertretend für diese Verfahren können KVP Ansätze (z.B. Kreativitätstechniken), sowie simulationsgestützte und erfahrungsbasierte Verfahren genannt werden.

Systematisch-analytische Verfahren generieren Innovationen und Lerneffekte hingegen durch eine gezielte Analyse und einen systematischen Ansatz zur Problemlösung. Dazu können gezielt Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung der betroffenen Bereiche eingeleitet werden. Auch durch die Beobachtung des Umfeldes im Rahmen von Benchmarkstudien lassen sich gezielt Lerneffekte auslösen. Auch über die Methoden des Industrial Engineering können Verbesserungspotentiale identifiziert und realisiert werden, die sich dann in Lerneffekten niederschlagen. [WES97]

Die in der Literatur aufgezeigten Analyse- und Prognosemethoden werden in der Regel nur einmalig zu Beginn der Planungsperiode eingesetzt. [LUE98] [NIE05] Ein Kostencontrolling zum Abgleich und zur Überwachung der Vorgaben mit dem Produktionsfortschritt kann in den bekannten Ansätzen daher erst nach dem realen Durchlauf der Planungsperioden durchgeführt werden. Durch diese sequentielle Betrachtung werden Planabweichungen und die Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen jedoch erst viel zu spät erkannt. Zudem kann keine dynamische Adaption des Systems bei sich ändernden Bedingungen während des Planungszeitraums erfolgen.

Für die zu erstellende Methodik soll daher jedoch eine kontinuierliche Fortschreibung der Planungszyklen unter der Integration des aktualisierten Planungs- und Betriebswissens erfolgen, um eine reaktionsschnelle Anpassung des Produktionssystems über den Lebenslauf zu gewährleisten. Hinreichende Ansätze hierzu sind bislang in der Literatur jedoch nicht bekannt.

2.3.3 Arbeitsplanung in Produktionssystemen

Um die konsequente Anwendung und Durchsetzung der Verbesserungsmaßnahmen über das gesamte Produktionssystem sicherzustellen, müssen diese jedoch bereits in der Arbeits-

vorbereitung hinterlegt werden. Nach Eversheim [EVE99b] stellt die Arbeitsvorbereitung das Bindeglied zwischen der funktionalen bzw. geometrischen Festlegung eines Produktes und seiner fertigungstechnischen Realisierung dar. Die Arbeitsvorbereitung wird in die Prozesse der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung untergliedert. [AWF85] Im Rahmen der Arbeitsplanung werden die Arbeitspläne erstellt, in denen die zu verwendenden Materialien, Fertigungsverfahren, Bearbeitungsreihenfolgen, Ressourcen und Zeitvorgaben (Hauptzeiten, Nebenzeiten, Brachzeiten, Verteilzeiten, Erholungszeiten etc.) festgelegt werden. Damit werden durch die Arbeitsplanung implizit auch die Fertigungskosten festgelegt. [BEI01], [WER01] Mit der Auftragsfreigabe werden dann diese Arbeitspläne um allgemeine und auftragspezifische Angaben (Identifizierung, Stückzahlen, Liefertermin) ergänzt und in die Arbeitssteuerung überführt. Die Auftragszeit für eine Ressource T ist nach REFA [REF78] als die Summe der Rüstzeit t_r pro Los und der Ausführungszeit t_a definiert, die sich aus der Bearbeitungszeit je Werkstück t_e multipliziert mit der Anzahl der Werkstücke m ergibt.

$$T = t_r + t_a = t_r + m \cdot t_e \quad (2-1)$$

Die Realisierung von Systemverbesserungen muss daher stets über eine Veränderung in den jeweiligen Planzeiten in den Arbeitsplänen erfolgen. Die Auswirkungen einzelner Maßnahmen müssen jedoch im Hinblick auf die Optimierung der Gesamtsystemleistung beurteilt und die Ursache-Wirkungsbeziehungen innerhalb des Produktionssystems analysiert werden.

2.3.4 Wirkung von Systemveränderungen

Kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen zielen darauf ab, den Wirkungsgrad (Systemverhalten) des Produktionssystems im Sinne der Zielfunktion positiv zu verändern. Der Wirkungsgrad eines Systems unterliegt jedoch allgemeinen Gesetzmäßigkeiten aus der Systemtechnik, die nach *Westkämper* [WES06] wie folgt zusammengefasst werden können:

- Die Teilsysteme und Elemente bilden ein komplexes, dynamisches Netzwerk
- Der Gesamtwirkungsgrad ist eine Funktion des Wirkungsgrads der Teilsysteme
- Überschüssige Ressourcen senken den Wirkungsgrad
- Fehlende Ressourcen senken den Wirkungsgrad (Gesetz des Minimums)

Aus diesen Gesetzmäßigkeiten folgt, dass Systemveränderungen stets im Kontext des gesamten Produktionssystems analysiert werden müssen, um die letztendlichen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad beurteilen zu können. Ressourcenüberschuss und Ressourcenmangel füh-

ren gleichermaßen zu einem sinkenden Systemwirkungsgrad. Der Identifikation einer optimalen Systemkonfiguration kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu. Dazu ist jedoch eine Kenntnis der Wirkungsbeziehungen innerhalb des komplexen Netzwerks Produktionssystem erforderlich.

Dabei kann die Wirkung von Maßnahmen mit einer zeitlichen Disparität zur Ursache eintreten. Zur Beurteilung der Wirkung von Maßnahmen sind daher lebenslauforientierte Evaluierungen notwendig, um insbesondere die langfristigen Auswirkungen zu analysieren. Abb. 2-9 zeigt, dass die vielschichtigen Ursache-Wirkungsbeziehungen nach dem Grad der Komplexität ihres Wirkungsgefüges, sowie nach dem Punkt des örtlichen und zeitlichen Einwirkens in einem morphologischen Schema klassifiziert werden können.

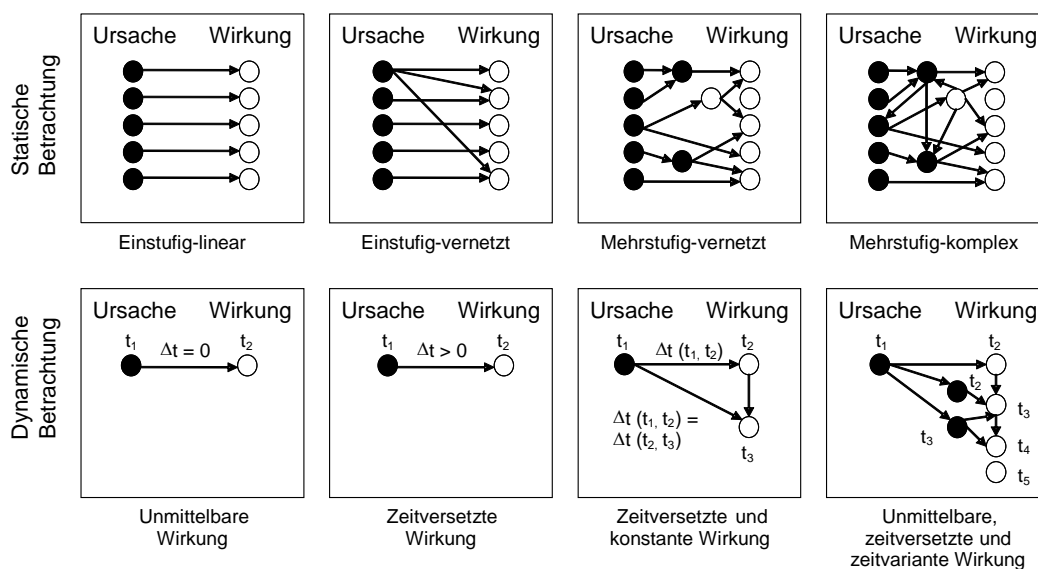


Abb. 2-9: Systematisierung der Ursache und Wirkungszusammenhänge [BRI02], [DOH01]

Die Wirkungen können zwar unmittelbar für jeden Einwirkungspunkt beschrieben werden, die Auswirkungen auf das gesamte Produktionssystem lassen sich jedoch durch die Komplexität der Wirkbeziehungen mathematisch nur mit einem sehr hohen Aufwand beschreiben. Daher bietet es sich an, hier auf simulationsbasierte Verfahren zurückzugreifen, mit denen die Wirkung von Maßnahmen auf das System und im Hinblick auf die Zielfunktion untersucht werden kann. [LOR97], [WER01]

2.3.5 Zwischenfazit zu den dynamischen Systemveränderungen

Interne und externe Veränderungstreiber bewirken dynamische Systemveränderungen über den Lebenslauf von Produktionssystemen, die durch kontinuierliche Planungszyklen zur Systemoptimierung aufgefangen werden müssen. Geplante Verbesserungsmaßnahmen müssen somit stets hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung auf das System beurteilt werden. Dazu sind simulationsbasierte Verfahren erforderlich, um die komplexen Interdependenzen der Systemelemente abzubilden und lebenslauforientiert bewerten zu können. Zur inneren Strukturierung eignen sich die Ansätze der Systemtechnik. Zur Datenbereitstellung kann auf die betriebliche Datenerfassung zurückgegriffen werden. Dazu sind jedoch die benötigten Daten nach ihrer Art und dem Entstehungsort zu bestimmen. Die Daten müssen für den Aufbau des Reglers in die Methodik integriert und im Rahmen der Systemabbildung verarbeitet werden. Die Planungslogik bestehender PPS/ERP-Systeme kann aufgrund der dargestellten konträren Ziel-funktion nur bis zum Zeitpunkt der Bedarfsauflösung eingesetzt werden. Bisher existiert noch keine Methodik, bei der die proaktiven Planungszyklen mit den realen Betriebsdaten in einem regelkreisbasierten System gekoppelt und zum Kostencontrolling eingesetzt werden. Für das zu erstellende Reglermodell müssen diese Daten zur Systemplanung, und -optimierung kontinuierlich nachgeführt und als Grundlage in weitere Planungszyklen eingebracht werden.

2.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung in Produktionssystemen

Ein weiteres Merkmal bezüglich der Abgrenzung von Produktionssystemen in der Serienfertigung stellt die Klassifikation und Gestaltung der Abrechnungsstruktur dar. [EVE99b] Die dazu in der Praxis eingesetzten Verfahren werden gemeinhin unter dem Begriff der Wirtschaftlichkeitsrechnung subsumiert. Die unterschiedlichen Verfahren haben zum Ziel, die Mengen und Geldbewegungen im betrieblichen Transformationsprozess abzubilden. [WÖH02] Dabei kann grundsätzlich zwischen den Verfahren zur Kosten- und Leistungsrechnung, den Verfahren zur Investitionsrechnung sowie den lebenslauforientierten Ansätzen unterschieden werden. [COE99], [BRI02]. Diese Verfahren sollen in den folgenden Kapiteln dargestellt und auf ihre Eignung für ein lebenslauforientiertes Controlling für Produktionssysteme untersucht werden. Dazu müssen im Hinblick auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit insbesondere auch bereits bekannte Ansätze zur simulationsbasierten Kostenanalyse berücksichtigt werden.

2.4.1 Verfahren der Kosten- und Leistungsrechnung

Die Aufgabe einer Kostenrechnung besteht darin, die bei der Unternehmenstätigkeit anfallenden Kosten zu erfassen und nach einem definierten Schlüsselungsprinzip auf die hergestellten Produkte (Kostenträger) zu verteilen. Die Kosten- und Leistungsrechnung zeichnet sich nach *Coenenberg* [COE99] und *Wöhe* [WÖH02] durch folgende Eigenschaften aus:

- Kurz- bis mittelfristiger Abbildungshorizont der Transformationsprozesse
- Kalkulatorischer Charakter durch Periodenorientierung
- Kontrolle der betrieblichen Wirtschaftlichkeit durch Soll-Ist Vergleiche
- Kosten- und Preiskalkulation von Produkten

Verfahren der Kosten- und Leistungsrechnung sind daher geeignet, den wirtschaftlichen Einsatz der Produktionsfaktoren zu überwachen. Die periodenorientierte Kostenerfassung bildet so die Grundlage für die (kurzfristige) Kostenplanung und -analyse von Produktionssystemen. Im folgenden Kapitel sollen daher spezielle Verfahren der Kosten- und Leistungsrechnung untersucht werden, die insbesondere zur Abbildung der Kostensituation in der Serienfertigung eingesetzt werden.

2.4.1.1 Verfahren der Kostenrechnung in der Serienfertigung

Für die Bewertung des Produktionssystems sind insbesondere die Fertigungskosten von Interesse. Diese setzen sich aus den Maschinenkosten, den Fertigungslöhnen und den Restfertigungsgemeinkosten zusammen. Das Schema der Kostengliederung ist dazu in Abb. 2-10 graphisch dargestellt.

Bewertung der Betriebsmittelressourcen

Zur Erfassung der Betriebsmittelkosten hat sich im Bereich der Serienfertigung die Maschinenstundensatzrechnung weitgehend durchgesetzt, da diese im Vergleich zur differenzierten Zuschlagskalkulation eine verursachungsgerechtere Zuordnung der Kosten auf die Aufträge ermöglicht. [WÖH02] Zur Bildung des Maschinenstundensatzes werden alle zu erwartenden maschinenbezogenen Kosten einer Planperiode summiert und durch die geplante verfügbare Ressourcennutzungszeit in der Planperiode geteilt. Daraus ergibt sich der jeweilige Stundensatz für jede einzelne Ressource des Produktionssystems. Für die Ermittlung der im Planungszeitraum zur Verfügung stehenden Ressourcennutzungszeit wird im Rahmen der Vorkalkula-

tion eine von der Vollbeschäftigung abgeleitete Gesamtstundenzahl ermittelt. Von dieser werden alle bereits im Vorfeld bekannten Stillstandszeiten (Wochenende, Auftragsmangel etc.) abgezogen, um daraus die verfügbare Nutzungszeit in der Planperiode zu erhalten. [PFE93], [HAT01] Um reale Kalkulationssätze zu erhalten ist es daher unabdingbar, die verfügbare Fertigungskapazität möglichst genau ex ante zu bestimmen. Um hier einen geschlossenen Regelkreis zu schaffen, sind die geplanten Stundensätze in der Nachkalkulation mit den tatsächlichen Ist-Verbräuchen zu vergleichen.

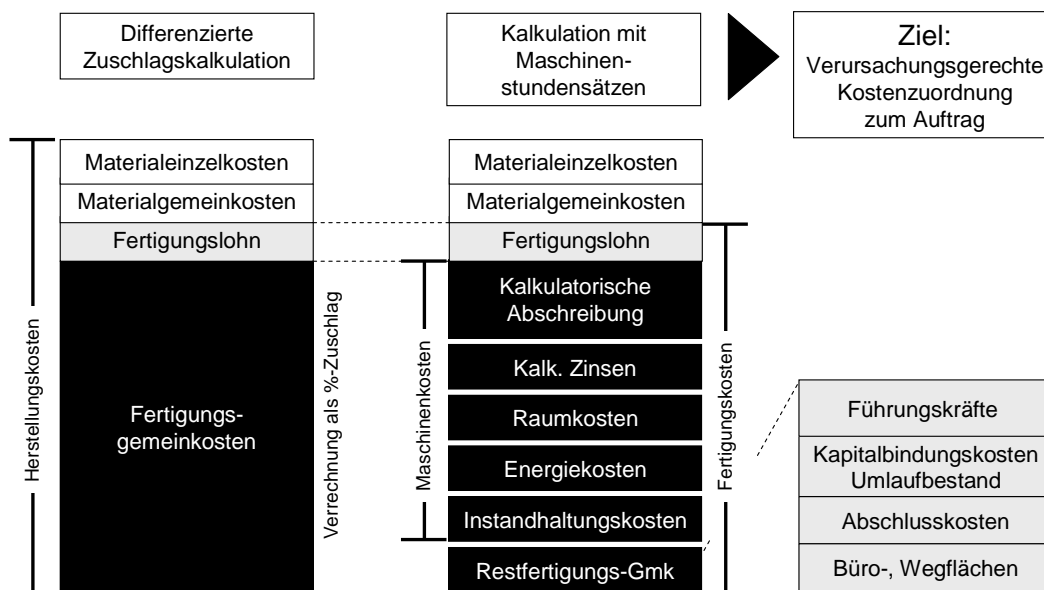


Abb. 2-10: Schema der Kostengliederung (nach [PLI00])

Die Bestandteile des Ressourcenstundensatzes $K_{R,h}$ für Betriebsmittel ergeben sich nach *Westkämper* [WES06] als die periodenbezogene Summe aus den Abschreibungskosten K_{RA} , den Zinskosten K_{RZ} , den Raumkosten K_{RR} , den Energiekosten K_{RE} und den Instandhaltungskosten K_{RI} bezogen auf die Ressourcennutzungszeit (Planbeschäftigung) I für diesen Zeitraum. Diese Zeit kann auch als Planbelegungszeit T_B der Ressource bezeichnet werden.

$$K_{R,h} = \frac{K_{RA} + K_{RZ} + K_{RR} + K_{RE} + K_{RI}}{I \text{ bzw. } T_B} \quad (2-2)$$

Die Berechnungsformeln für die Bestandteile des Ressourcenkostensatzes sind umfassend in zahlreichen Literaturquellen erläutert und werden daher im Folgenden nicht weiter hergeleitet. Als Standardwerke sei an dieser Stelle auf *Pflieger* [PFL93], *Schweitzer* [SCW03], sowie

Westkämper [WES06] verwiesen. Der Einsatz der Maschinenstundensatzrechnung der Serienfertigung hat in Anlehnung an die genannten Autoren zusätzlich folgende Vorteile:

- Die Abrechnung der Leistungen erfolgt verursachungsgerecht gemäß der zeitlichen Inanspruchnahme der Ressourcen.
- Kapazitäten und Kosten werden in die Planung mit einbezogen.
- Durch die transparente Gliederung der einbezogenen Kostenarten können die Wirkungen von Verbesserungsmaßnahmen übersichtlich dargestellt werden, denn
 - sie kann für Wirtschaftlichkeitsberechnungen eingesetzt werden
 - andere Kalkulationsverfahren können leicht integriert werden.

Aufgrund der ressourcenorientierten Kostenerfassung eignet sich die Maschinenstundensatzrechnung auch insbesondere für den Einsatz in Kostensimulationssystemen. [VDI3633-7]

Bewertung der Personalressourcen

Als weitere Größe gehen die Fertigungslöhne in die Ermittlung der Fertigungskosten ein. Diese werden durch die Bewertung der Ressource Personal bestimmt. Entsprechend der zeitlichen Inanspruchnahme wird der qualifikationsabhängige Lohnsatz K_L mit der Einsatzzeit T_P multipliziert, sodass die Lohnkosten des Personals K_P wie folgt ermittelt werden können:

$$K_P = K_L \cdot T_P \quad (2-3)$$

Der Verrechnungssatz für die Löhne und Gehälter können aus der Lohnbuchhaltung abgefragt werden. [SCW03]

Bewertung der indirekten Bereiche

Für die indirekten Bereiche der Arbeitsplanung liegen zumeist keine detaillierten Zeiterfassungen für die Durchführung einzelner Tätigkeiten und den zeitlichen Ressourcenverzehr vor. Um auch hier die Zeit als Basis zu hinterlegen, können die Prozesse mit einem Kostensatz pro Zeiteinheit belegt werden. Je nach Bezugsgröße werden die jeweiligen Restfertigungsgemeinkostensätze auf den entsprechenden Ressourcenstundensatz beaufschlagt.

Diese Kostensätze enthalten Zuschlagsgrößen für spezielle übergeordnete Personalgruppen wie z.B. die Unternehmensführung und die Planungsabteilungen. Auch werden häufig die Aufgaben der Qualitätssicherung, des Werkzeugwesens, sowie Reinigungs- und Bürokosten etc. darin eingerechnet. [WÖH02]

2.4.1.2 Erfassung der Systemleistung

Durch den Transformationsprozess entstehen Kosten, denen die erzeugten Leistungen gegenübergestellt werden. Dabei ist jedoch die Bewertung der Leistungen in monetären Größen als problematisch anzusehen, denn die Bewertung der erstellten Güter in Geldeinheiten erfolgt erst durch den Produktverkauf. Dieser geschieht jedoch außerhalb der Bilanzgrenze des Produktionssystems. Die Erlöse hängen in diesem Fall von verschiedenen in Bezug auf die „Bilanzgrenze Produktionssystem“ exogenen Faktoren wie z.B. der Nachfrage, Konkurrenzsituation oder gewährter Skonti etc. ab und erweisen sich daher als eine nur unzulängliche Größe zur Bestimmung der Systemleistung. Innerhalb der Systemgrenzen kann daher nur die erzielte Mengenleistung innerhalb der Bilanzgrenzen gemessen und als Outputgröße zu den entstandenen Kosten in Beziehung gesetzt werden. Die zeitliche Ausbringungsmenge eines Produktionssystems wird jedoch in entscheidendem Maße durch die Nutzensausbeute an den einzelnen Maschinen bestimmt. Während der Fertigung treten stets Nutzungsverluste auf, die sich in technisch oder organisatorisch bedingten Ausfallzeiten niederschlagen. [VDI3423] Ziel für ein Regelmodell muss es daher sein, diese Einflüsse zu erkennen und als Stellgrößen zur Optimierung der Systemleistung zu begreifen.

Im Rahmen des Total Productive Maintenance (TPM) sind hierzu Ansätze entstanden, mit denen die Gesamtanlageneffektivität gemessen und dargestellt werden kann. So wird in den grundlegenden Arbeiten von *Shirose* [SHI92a], [SHI92b] und *Al-Radhi* [ALR96] die Gesamtanlageneffektivität als Verlustfaktor definiert, unter dem fünf Verlustquellen in drei Hauptfaktoren zusammengefasst werden (vgl. Abb. 2-11).

Die Multiplikation der drei Faktoren Nutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad ergibt dann die Gesamtanlageneffektivität (OEE-Overall Equipment Effectiveness). Mit dem OEE wird der prozentuale Zeitanteil beschrieben, in der eine Maschine mit ihrem vollen Leistungsvermögen produziert. Auf diese Weise entsteht eine Kennzahl, die den Wirkungsgrad der Anlage während der Betriebszeit beschreibt. [HAT01] Dieser Ansatz hat in der industriellen Praxis weite Verbreitung gefunden. Die Verwendung der Zeit als einheitliche Berechnungsgrundlage hat dabei den Vorteil, dass diese in vielen Fällen leichter über die betrieblichen Datenerfassungssysteme zu ermitteln ist, als eine Berechnung über das Stückzahlverhältnis von theoretischer Systemleistungen und dem real erreichten Output.

In der Berechnung wird von einer angenommenen Systembelegungszeit für den kommenden Planungszeitraum ausgegangen. Von der Belegungszeit werden in einem ersten Schritt die Zeiten für Rüst- und Einstellvorgänge abgezogen. Des Weiteren werden von der verbleibenden Zeit noch die Anteile für ungeplante Stillstandszeiten durch Maschinenversagen abgezogen. Diese beiden Verlustquellen führen zu einer Nettobetriebszeit, in der die Anlage theoretisch für den produktiven Einsatz zur Verfügung steht.

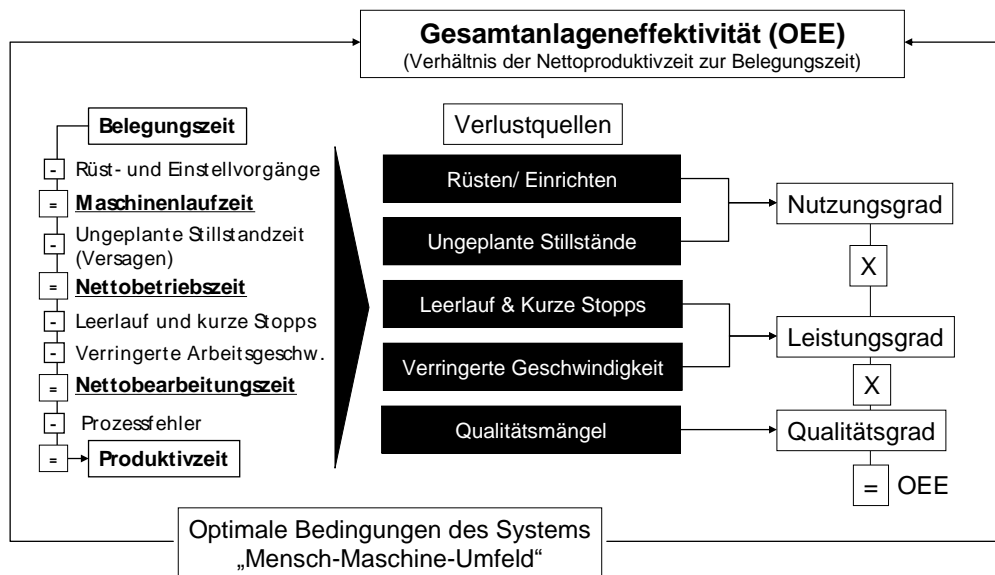


Abb. 2-11: Messung des Systemnutzens über die Gesamtanlageneffektivität
(in Anlehnung an [HAT01] und [VDI3423])

Der Quotient aus der Differenz von Belegungszeit, Rüst- bzw. Einstellvorgängen und Maschinenversagen zur Belegungszeit wird durch den Nutzungsgrad ausgedrückt. Mathematisch ergibt sich der Nutzungsgrad $\eta_{Nutzung}$ aus der Differenz von Belegungszeit T_B abzüglich der Rüstzeit t_r und der ungeplanten Stillstandszeiten T_{Still} im Verhältnis zur Belegungszeit T_B .

$$\eta_{Nutzung} [\%] = \frac{T_B - t_r - T_{Still}}{T_B} \cdot 100\% \quad (2-4)$$

Mit der Ausweisung des Anlagennutzungsgrades kann damit ein Verlustfaktor dargestellt werden, der Potentiale in den Bereichen Rüsten, ungeplanter Stillstand und Maschinenversagen transparent darstellt.

Ausgehend von der Nettobetriebszeit treten im Verlauf der Produktion kurzzeitige Stillstände, Leerlaufzeiten und verringerte Arbeitsgeschwindigkeiten auf, wodurch die optimale Leistungsausbeute an der Anlage weiter geschmälert wird. Verringerte Arbeitsgeschwindigkeiten

treten z.B. beim Einfahren der Anlage für das Erstteil eines Auftrages auf. Diese Verluste werden mit dem Leistungsgrad $\eta_{Leistung}$ der Anlage beschrieben, der sich als die Differenz aus Nettobetriebszeit $T_{Nettobetrieb}$ und den Zeitverlusten für Stopps und Minderleistungen T_{LV} im Bezug zur Nettobetriebszeit ergibt:

$$\eta_{Leistung} [\%] = \frac{T_{Nettobetrieb} - T_{LV}}{T_{Nettobetrieb}} \cdot 100\% \quad (2-5)$$

Während der Bearbeitungszeit treten jedoch noch weitere Verluste durch die Produktion von fehlerhaften Teilen auf. Diese Qualitätsmängel werden mit der Kennzahl des Qualitätsgrades erfasst und ausgedrückt. Für die Berechnung wird daher die Differenz aus der Nettobearbeitungszeit $T_{Nettbearbeitung}$ und dem Zeitaufwand für Qualitätsmängel T_Q zur Nettobearbeitungszeit ins Verhältnis gesetzt. Damit ergibt sich der Qualitätsgrad $\eta_{Qualität}$ zu:

$$\eta_{Qualität} [\%] = \frac{T_{Nettbearbeitung} - T_Q}{T_{Nettbearbeitung}} \cdot 100\% \quad (2-6)$$

Durch die Multiplikation der drei Indizes ergibt sich die Gesamtanlageneffektivität OEE zu:

$$OEE [\%] = \eta_{Nutzung} [\%] \cdot \eta_{Leistung} [\%] \cdot \eta_{Qualität} [\%] \quad (2-7)$$

Der OEE umfasst damit alle anlagenbedingten Verlustfaktoren während der geplanten Belegungszeit. Die Differenz zu 100% weist somit das Verbesserungspotential bezüglich der untersuchten Verlustquellen aus („Verschwendung“).

Das Kennzahlensystem ist jedoch nur für die Untersuchung einzelner bzw. unverketteter Maschinen geeignet. Erweiterungen der Systematik auf komplexere Systemstrukturen finden sich dazu u.a. bei Krüger [KRU00] und Griffel [GRI99], die beide auf den Einsatz von Simulationswerkzeugen verweisen, um komplexere Systemzusammenhänge analysieren zu können.

Mit Bezug zu den zuvor dargestellten Gesetzmäßigkeiten eines Systems (vgl. Kapitel 2.2.1.2 und 2.3.4) ergibt sich die Gesamtleistung eines Systems als Funktion der einzelnen Systemelemente. Erhöhungen des Systemnutzens gehen dann mit gezielten Verbesserungsmaßnahmen einher, die sich entweder in Kostensenkungen oder Steigerungen der Mengenleistung durch Veränderungen des OEE ausdrücken.

2.4.2 Verfahren zur Investitionsrechnung

Einen weiteren Ansatz zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit stellen die Verfahren der Investitionsrechnung dar. Diese heben auf die einmalige Darstellung der Wirtschaftlichkeit eines Investitionsobjektes über einen langfristigen Planungszeitraum ab.

Mit dem Begriff der Investition wird der Strom aller Ein- und Auszahlungen in Verbindung mit dem Produktionsprozess bezeichnet. Eine Investition kann daher als zeitliche Abfolge von Zahlungsvorgängen verstanden werden, die mit einer Auszahlung beginnt und dafür Geldrückflüsse in der Zukunft erwartet. [WÖH02]

Als Instrumentarium zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Mitteleinsatzes stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die in den folgenden Kapiteln hinsichtlich ihrer Eignung für den Aufbau eines lebenslauforientierten, kontinuierlichen Kostenrechnungssystems untersucht werden müssen. Die Verfahren gliedern sich in statische und dynamische Ansätze, die sich hinsichtlich ihrer Randbedingungen, praktischen Durchführbarkeit und Genauigkeit unterscheiden. [PLI00], [WÖH02]

2.4.2.1 Statische Verfahren der Investitionsrechnung

Unter den statischen Verfahren werden diejenigen Rechenmethoden verstanden, bei denen der Zeitfaktor des Geldes nur unzureichend berücksichtigt wird. Dies bedeutet, dass zeitliche Unterschiede in den Zahlungszeitpunkten bei diesen Verfahren nicht berücksichtigt werden. Zur Abbildung mehrerer Perioden werden daher Durchschnittswerte oder die Daten aus einer Referenzperiode fortgeschrieben. [HOR99] Ziel der statischen Verfahren ist die Optimierung von Investitionswahlentscheidungen. [WÖH02] Aufgrund der einfachen Handhabung der statischen Verfahren haben die Verfahren der Kostenvergleichsrechnung, Amortisationsrechnung, Gewinnvergleichsrechnung und Rentabilitätsrechnung eine breite Anwendung in der Praxis gefunden.

Die Kostenvergleichsrechnung zielt auf die Gegenüberstellung der zu erwartenden Kosten von verschiedenen alternativen Investitionsszenarien. Das vorteilhafteste Szenario weist hierbei die geringsten Gesamtkosten über den betrachteten Zeitraum im Vergleich zu den anderen Alternativen aus. Das Verfahren kann als Vergleich pro Periode oder auch mit relativen Bezugsgrößen (Kosten pro Stück etc.) durchgeführt werden, wobei alle durch das Investitionsobjekt verursachten Kapital- und Sachkosten in die Rechnung einfließen. [WÖH02]

Die Amortisationsrechnung (pay-back Methode) baut auf der Kostenvergleichsrechnung auf und untersucht den Zeitraum, in der das eingesetzte Kapital über die Kosteneinsparungen wieder zurückfließt. Je kürzer die zu erwartende Amortisationszeit im Vergleich zum betriebsinternen Grad der Risikoaversität (die als zulässig erachtete Refinanzierungszeit) ist, desto vorteilhafter ist die Investition. Die Methode zeigt daher auf, wann die erwarteten Rückflüsse die zuvor getätigten Ausgaben genau kompensieren (break-even-point). Die in der Praxis weit verbreitete Methode kann daher auch für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von zusätzlichen Aufwendungen für Rationalisierungsmaßnahmen eingesetzt werden. [WÖH02] Im Gegensatz dazu benutzen die Verfahren der Gewinnvergleichsrechnung und der Rentabilitätsrechnung den Gewinn als Rechengröße. [SCW03] Gemäß der Aufgabenstellung (vgl. Kapitel 1.2) und der zuvor dargestellten Problematik zur Bestimmung des Systemnutzens (vgl. Kapitel 2.4.1.2) sind Erlös bzw. Gewinnbetrachtungen nicht Gegenstand der Arbeit.

2.4.2.2 Dynamische Verfahren der Investitionsrechnung

Dynamische Verfahren sind dazu geeignet, die zeitlichen Aspekte einer anstehenden Investitionsentscheidung zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere für Investitionsentscheidungen wichtig, deren Wirtschaftlichkeit über einen langfristigen Zeithorizont beurteilt werden soll. Die Verfahren normieren die zeitliche Disparität zwischen den Zahlungszeitpunkten durch eine Diskontierung der Zahlungsflüsse. [WÖH02] In der Praxis sind dazu die Kapitalwert-, interne Zinsfuß- und die Annuitätenmethode sowie die dynamische Amortisationsrechnung weit verbreitet.

Mit der Kapitalwertmethode werden die anfänglichen Investitionskosten den zu erwartenden Zahlungsüberschüssen gegenübergestellt. Dazu werden die Einzahlungen und Auszahlungen periodenweise saldiert und unter Zugrundelegung eines internen Kalkulationszinsfußes jeweils abdiskontiert. Die Summe aller Zahlungen ergibt als Ergebnis den Barwert einer Investition. Dieser beschreibt den Wert der Investition, den sie zusätzlich zu ihrer geforderten Mindestverzinsung (interner Zinsfuß) über den betrachteten Zeitraum erbringt. Eine Investition ist nach diesem Verfahren genau dann als vorteilhaft anzusehen, wenn sich der Barwert größer bzw. gleich Null errechnet. [PLI00]

Die interne Zinsfußmethode baut auf der Kapitalwertmethode auf und beschreibt die zu erwartende Verzinsung des eingesetzten Kapitals. Mathematisch wird dazu der Kapitalwert gleich Null gesetzt und die Gleichung hinsichtlich der Variable „Zinssatz“ aufgelöst. [PER04]

Auch die Annuitätenmethode baut auf der Kapitalwertmethode auf. Die Annuität beschreibt die Umrechnung des Kapitalwertes in gleiche (durchschnittliche) Periodenrückflussbeträge. Dieser Wert kann auch als Annuitätenfaktor bzw. Wiedergewinnungsfaktor ausgedrückt werden, mit dem durch Quotientenbildung die Annuität des Kapitaleinsatzes oder der Rückflüsse dargestellt werden kann.

Das Verfahren der dynamischen Amortisationsrechnung kann als Erweiterung der statischen Amortisationsrechnung gesehen werden. Dabei werden zukünftige Zahlungsrückflüsse mit einer periodenorientierten Abzinsung in die Berechnung der Amortisationszeit integriert. Damit ermöglicht die dynamische Amortisationsrechnung eine Aussage über die reale Kapitalerhaltung.

2.4.3 Lebenslauforientierte Bewertungsansätze

Lebenslauforientierte Bewertungsansätze zielen auf die Zusammenstellung und Analyse aller Kosten, die für ein Produkt (z.B. ein Investitionsgut) über dessen Lebenslauf entstehen. Der Lebenslauf beginnt mit der Idee und endet mit der Entsorgung des Produktes. [BRI01], [MIC04] Mit einer lebenslauforientierten Kostenbetrachtung (Life Cycle Costing – LCC) können die Zusammenhänge von Anschaffungskosten und den sich daraus ergebenden Folgekosten analysiert werden. [DIN60300], [VDMA34160], [VDI2884]

Die Untersuchungen von *von der Osten-Sacken* [OST99] und *Gerhardt* [GER98] zeigen, dass die laufenden Kosten für den Betrieb eines Investitionsgutes die Anfangskosten (=Investitionskosten) um ein Vielfaches übersteigen. Die Gründe hierfür liegen in der langen Lebensdauer der Produkte, in der die Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung der Anlagen periodisch wiederkehren. Den reinen Investitionskosten ist somit ein weitaus höherer Anteil von laufenden Betriebskosten nachgelagert. [NIE03a] Weiterhin bestehen große Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Phasen des Anlagenlebenslaufes. So wirken sich Entscheidungen in der Konzeption erst viel später in der Phase der Anlagennutzung aus. Ziel des Life Cycle Costings ist es, diese sog. Trade-offs zwischen den einzelnen Lebensphasen zu optimieren (vgl. Abb. 2-12).

In Abgrenzung zu den „klassischen“ Verfahren der Kostenanalyse sind daher bei einer Lebenslaufanalyse die langfristigen Hebelwirkungen von Kostenentscheidungen Gegenstand der Untersuchung. *Niestadtötter* [NIK01] und *von der Osten-Sacken* [OST99] postulieren daher, dass Lebenslaufanalysen mindestens zwei Lebenslaufphasen umfassen müssen. Beide Autoren sehen dabei jedoch technische Änderungen der Anlage innerhalb der Nutzungsphase für funktional andere Bearbeitungsaufgaben bereits als Eintritt in eine neue (funktionsbezogene) Lebenslaufphase an. Die (gebrauchsbezogene) Nutzungsdauer eines Investitionsgutes kann somit je nach Verwendung durch mehrere funktionsbezogene Lebenslaufphasen gekennzeichnet sein, über die mit lebenslauforientierten Ansätzen ein Kostenoptimum gesucht wird. In den bislang bekannten Ansätzen steht jedoch die Gestaltung von Trade-offs zwischen den Phasen der Produktherstellung und der Produktnutzung im Vordergrund.

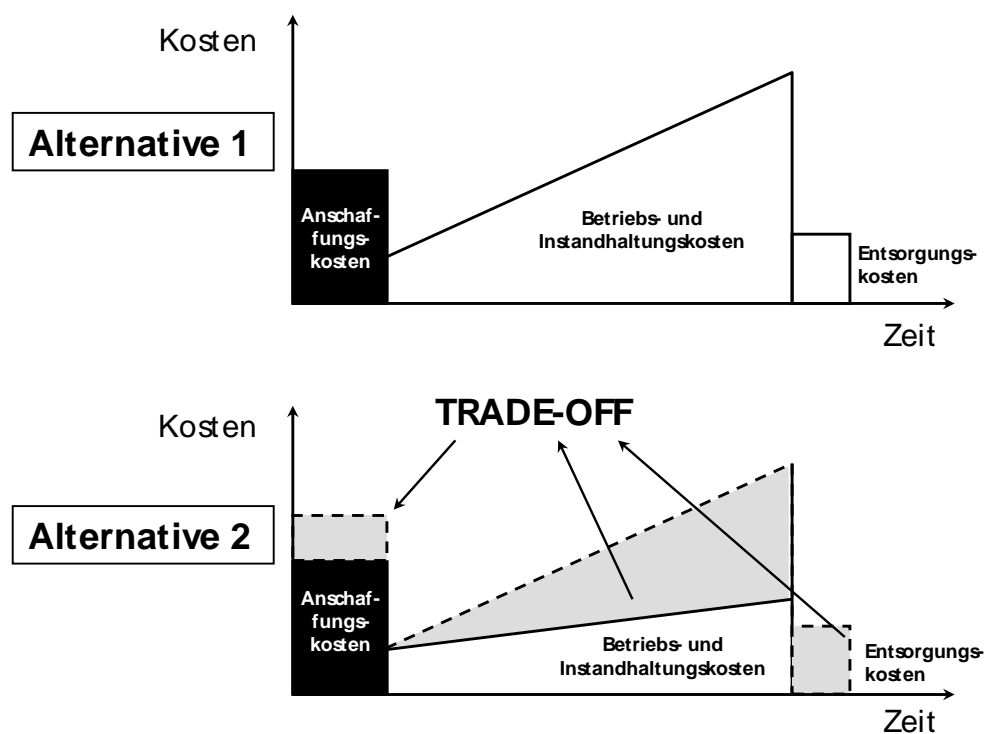


Abb. 2-12: Untersuchung von Trade-offs über die Zeit (in Anlehnung an [NIE03])

Von der Osten-Sacken [OST99] hat hierzu in seiner grundlegenden Arbeit ein parametrisiertes Modell zur Erfassung und Analyse der Lebenslaufkosten vorgelegt. *Förstemann* [FOE04] entwickelte ein Modell für den Flugzeugbau, bei dem der Saldo über alle zukünftigen Erlöse und Kosten als „Wertbeitrag“ einer Konstruktionsänderung für den Kunden ausgewiesen wird. *Mateika* [MAT05] baut ein Modell zur wertschöpfungsmaximalen Produktgestaltung

aus Herstellersicht auf. Kern der Arbeit ist die szenariobasierte Analyse von zukünftigen Entwicklungsrichtungen im Umfeld eines Produktes. Entsprechend der ermittelten künftigen Szenarien kann dann die (einmalige) Produktgestaltung erfolgen.

Im Ansatz von *Fleischer et al.* [FLE04a], [FLE04b] wird der Nutzen eines Investitionsgutes über die reale Ausbringungsmenge (Stückzahl) in die Kalkulation integriert. Damit können Veränderungen des technischen Anlagennutzens über die Systemleistung bestimmt und marktseitige Einflüsse (z.B. auf die Absatzpreise) ausgeblendet werden. Die Bestimmung der sog. „Life Cycle Performance“ ist ihrem Charakter nach vorkalkulatorisch und für die einmalige Entscheidungsfindung bzgl. alternativer Investitionsszenarien gedacht. Sie bezieht sich jedoch nur auf Einzelmaschinen oder starr verkettete Transferstraßen. [FLE05]

Im Bereich der lebenslaufbegleitenden Dienstleistungen sind verschiedene Ansätze entstanden, die eine Erfolgsbilanzierung auch unter Nutzenaspekten vorsehen. [NIE03], [STO03], [TÖN04], [WES04c]

In den bekannten Ansätzen wird die Methodik des Life Cycle Costings bisher zur Erfassung und Darstellung der Wirtschaftlichkeit für einzelne Investitionsgüter genutzt. Für das zu erstellende Reglermodell ist es jedoch erforderlich, die Methodik auf die Ebene eines Produktionssystems auszuweiten. Ansätze hierzu sind bislang nicht bekannt. Die Daten werden bis dato punktuell eingepflegt und für eine einmalige Entscheidungsunterstützung aufbereitet (z.B. Investitionsentscheidung, Produktgestaltung). [DEN05] Langzeituntersuchungen von Wildemann [WIL98] belegen jedoch, dass die Validität von einmaligen Lebenslaufplanungen über einen großen Zeithorizont mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Eine kontinuierliche Nachführung und Neuevaluation über den fortschreitenden Lebenslauf in der Nutzungsphase findet bislang nicht statt. Aus diesem Grund muss die Lebenslaufkostenrechnung in dieser Arbeit in ein Life Cycle Controlling überführt werden, mit dem Trade-offs in der Systemrekonfiguration über mehrere funktionsbezogene Nutzungsphasen hinweg identifiziert und die Realisierung der prognostizierten Potentiale überwacht werden kann.

2.4.4 Simulationsgestützte Kostenanalyse

Zum Zeitpunkt der Investitionsplanung ist es problematisch, den Einsatz und die Verwendung des Investitionsgutes über den gesamten Lebenslauf zu prognostizieren. So kann eine belastbare Systemplanung nur für einen begrenzten Zeithorizont durchgeführt werden. Daher muss

eine kontinuierliche Planungsumgebung geschaffen werden, mit der die dynamischen Veränderungen abgebildet und analysiert werden können. Aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge des Systems muss dazu auf den Einsatz von Simulationswerkzeugen zurückgegriffen werden. [GRI99], [MUE01], [WES03], [VDI3633-7], [NIE05a]

Die Simulation wird dabei als die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell definiert, um zu Erkenntnissen über die Wirklichkeit zu gelangen. [VDI 3633-1], [REH04]. Abb. 2-13 stellt die unterschiedlichen Ebenen für den Einsatz von Simulationstechnologien in einem Überblick dar. Die Planungsinhalte dieser Arbeit beziehen sich gemäß der Aufgabenstellung auf die Evaluation von Produktionssystemen bezüglich der Systemleistung, sowie der Identifikation und Beurteilung von geeigneten Entstörstrategien.

Planungsebene	Planungsinhalt	Simulationsmodell
Fabrik/ Produktionssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenlayout • Materialfluss/ Logistik • Systemleistung/ Wirtschaftlichkeit • Fertigungsprinzip • Steuerungsstrategien • Entstörstrategien 	Ablaufsimulation (grob)
Anlage/Maschine	<ul style="list-style-type: none"> • Zellenlayout • Ablaufvorschriften • Taktzeitoptimierung • NC Programmierung • Kollisionsvermeidung 	Ablaufsimulation (fein) Kinematik-Simulation
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsmittelbeanspruchung • Prozessparameter • Werkzeuge • Hilfsmittel 	Kinematik-Simulation Finite-Elemente Methode (FEM) Mehrkörper-Simulation (MKS)

Abb. 2-13: Einordnung der Simulationstechnologien in die Planungsebenen
(in Anlehnung an [REH02])

In Anlehnung an die *VDI-Richtlinie 3633* [VDI 3633-1], [VDI 3633-7] sowie *Lanza* [LAN05] und *Werner* [WER01] zeichnet sich die Ablaufsimulation durch folgende Vorteile aus:

Abbildung komplexer Wirkzusammenhänge

Durch den Einsatz der Simulation können die komplexen Wirkzusammenhänge des Systems abgebildet und untersucht werden, denn die Anzahl der Systemressourcen sowie deren ablauf-

organisatorische Vernetzung kann mit den klassischen analytischen Verfahren nur noch unzureichend abgebildet werden.

Abbildung stochastischer Störgrößen und dynamischer Effekte

Die Systemressourcen unterliegen im realen Systembetrieb Störungen über die Zeit. Mit der Simulation können diese Ausfälle in ihrer Art und Dauer nachgebildet werden, so dass ein realitätsnahes Modell entsteht. Die Auswirkung einzelner Störungen auf das Gesamtsystem können ansonsten mit steigendem Komplexitätsgrad nur noch unzureichend mit analytischen Systemen erfasst werden.

Identifikation von Engpässen, Evaluation von Verbesserungsmaßnahmen

Durch eine Ablaufsimulation wird der Nutzer in die Lage versetzt, Schwachstellen und Engpässe des Systems zu erkennen und abzustellen. Die Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems kann damit vor der Umsetzung in der Produktion untersucht und evaluiert werden.

Lorenzen [LOR97] hat in diesem Zusammenhang eine simulationsgestützte Kostenanalyse für produktorientierte Fertigungsstrukturen entwickelt, in der die Ressourcen mit verschiedenen Ressourcenkostensätzen bewertet werden. Allerdings erfolgt keine direkte Verknüpfung der Simulation über die Betriebsdatenerfassung an die Planungssystematik. Daher ist das Verfahren nicht als regelkreisbasiertes Modell ausgelegt, sondern zielt vielmehr auf die Abbildung und kostenorientierte Analyse des Systemzustands ab.

Von Briel [BRI02] hat ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Bereichen vorgelegt. Das Modell zielt jedoch hauptsächlich auf die übergeordnete Bewertung von Anpassungsinvestitionen zu einem bestimmten Zeitpunkt ab. Aspekte eines regelkreisbasierten, kontinuierlichen Controllings werden durch die fehlende Betriebsdatenanbindung an das reale System nicht betrachtet.

Brecher [BRE05] hat ein generisches Datenmodell zur Modellierung flexibler Fertigungssysteme entwickelt. Das Modell ist für die Fertigungsleittechnik bestimmt und bildet die Systemobjekte (Entitäten) und deren Beziehungen zueinander ab. Als problematisch erweist sich hier die Abbildung dynamischer Vorgänge, die durch Anfangs- und Übergangszuständen aus-

gedrückt werden. Diese sind für komplexe Produktionssysteme, wenn überhaupt, nur sehr aufwendig zu beschreiben.

Werner [WER01] beschreibt eine simulationsgestützte Prozesskostenrechnung für die Kalkulation von Logistikprozessen und setzt die Zeit der Ressourceninanspruchnahme als Basis. Er fasst die Leistungserstellung durch die einzelnen Ressourcen zu Prozessen zusammen und errechnet hierfür Prozesskostensätze, die sich aus einer Verknüpfung der jeweiligen Hauptkostentreiber ergeben.

Lanza [LAN05] hat ein Simulationsmodell für den Serienanlauf entwickelt, das auf den Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen aufbaut.

Die Analyse der betrachteten Ansätze zeigt jedoch insgesamt, dass der Aspekt des Controllings der Systemleistung nicht oder nur ansatzweise ausgeschöpft wird. Die Methoden zielen zumeist auf einmalige, vorkalkulatorische Analysen von Betriebszenarien ab, ohne diese Annahmen mit der Nachkalkulation zu koppeln. Damit sind die bekannten Ansätze als Steuerungsmodelle ausgelegt, in denen alternative Systemstrukturen geplant und evaluiert werden können. Im Sinne einer permanenten Systemoptimierung sind jedoch Modelle erforderlich, mit denen eine permanente Regelung der inneren Systemkonfiguration in Abhängigkeit der erforderlichen Systemkapazitäten erfolgen kann.

2.4.5 Zwischenfazit zur Wirtschaftlichkeitsrechnung in Produktionssystemen

Mit den Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung können verschiedene Aspekte von Produktionssystemen aus unterschiedlichen Blickwinkeln heraus kostenorientiert bewertet werden. Die Kosten- und Leistungsrechnung zielt dabei auf die kurz- bzw. mittelfristige Darstellung und Bewertung der Systemleistung ab. Die Verfahren sind geeignet, den ressourcenorientierten Werteverzehr in Abhängigkeit von der erstellten Ausbringungsmenge darzustellen. Damit kann die Kosten- und Leistungsrechnung zur Kalkulation der Stückkosten eingesetzt werden. Die Verfahren der Investitionsrechnung sind zur Untersuchung der langfristigen Vorteilhaftigkeit von investiven Verbesserungsmaßnahmen geeignet. Aufgrund der Tatsache, dass heute in der industriellen Praxis in der Regel die Wirtschaftlichkeit von Investitionen innerhalb von zwei Jahren nachgewiesen werden muss, spielen Verzinsungseffekte nur eine untergeordnete Rolle. Daher ist der Einsatz von statischen Verfahren innerhalb des Regelungsmodells als ausreichend anzusehen. Die Kostenvergleichs- und Amortisationsrechnung ist daher

für den Einsatz im Regelungsmodell geeignet. Mit den Verfahren kann überprüft werden, ob und wann durch geplante Maßnahmen Kosteneinsparungen erzielt werden. Mit den lebensau-
forientierten Modellen können insbesondere Trade-off Analysen durchgeführt werden. Diese
sind gerade im Hinblick auf die komplexen Wirkzusammenhänge innerhalb des Systems so-
wie bei der Beurteilung der dynamischen Entwicklung des Systems über den Lebenslauf von
Interesse.

Im Reglermodell müssen daher für die Abbildung der unterschiedlichen Effekte und Kosten-
sichten für die kontinuierliche Systemevaluation sowohl eine ressourcenorientierte Kosten-
rechnung, aber auch Verfahren der Investitionsrechnung sowie des Life Cycle Costings bereit-
gestellt werden.

Die bekannten simulationsbasierten Ansätze zur Kostenanalyse zeigen jedoch auch, dass bis-
lang keine Methodik existiert, in der diese Werkzeuge für ein regelkreisbasiertes Controlling
der Produktionssysteme eingesetzt werden.

2.5 Zusammenfassung der Grundlagen zur Produktionssystemgestaltung

Als Grundlagen für die Erstellung einer Methodik wurden in den zuvor beschriebenen Kapi-
teln bestehende Ansätze zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen
in der Serienfertigung analysiert und dargestellt.

Dazu wurde zunächst in einer Definition des Produktionsbegriffs (vgl. Kapitel 2.1) festges-
tellt, dass die Festlegung der Systemgrenzen neben der Fertigung auch unterstützende und
planerische Funktionen beinhaltet. Die Methodik muss daher diese Funktionen integrieren und
eine entsprechende Unterstützung bereitstellen.

Die Analyse bestehender Gestaltungsansätze zur inneren Systemstruktur (vgl. Kapitel 2.2)
zeigt, dass Produktionssysteme in der Serienfertigung als autonome, geschlossene Einheiten
gestaltet sind. Der Systembetrieb wird durch standardisierte Prozessabläufe unterstützt und
unterliegt ganzheitlichen Optimierungsbemühungen hinsichtlich der Kosten, Zeiten und der
Qualität. Dabei eignet sich das Stuttgarter Unternehmensmodell als Grundlage zur Modellie-
rung und Abbildung eines Produktionssystems in der Serienfertigung. Die Beschreibung der
Leistungseinheiten kann objektorientiert in Anlehnung an die Systemtechnik erfolgen. Auf
diese Weise können dynamische Veränderungen in ihren Einwirkungspunkten auf das System ge-
nau beschrieben werden. (vgl. Kapitel 2.3). Kontinuierliche Systemanpassungen werden hier-

bei durch veränderte Auftragsstrukturen sowie industrielle Lernprozesse ausgelöst. Zur Abbildung des dynamischen Systemverhaltens müssen dazu zunächst in einem Modell die Daten zur statischen Beschreibung der Ressourcen in ihrer Art und Herkunft spezifiziert werden. Weiterhin muss die Methodik ein Verfahren bereitstellen, mit der die Abbildung von Veränderungen an den Einwirkungspunkten im hinterlegten Systemmodell erfolgen kann.

Die kontinuierliche Aktualisierung der gegenwärtigen Planungssituation erfordert dazu eine Rückkopplung an die realen Prozesse im Unternehmen. Diese ist aufgrund der Komplexität der Wirkzusammenhänge in den bislang bekannten Ansätzen nicht realisiert. Eine direkte wirtschaftliche Rückkopplung im Rahmen einer permanenten Systemüberwachung findet daher nur unzureichend statt.

Defizite bestehen in der mangelnden Integration von Planungs- und Betriebsdaten in ein lebenslauforientiertes Planungssystem, mit dem nutzensteigernde Anpassungen und notwendige Veränderungen eines Produktionssystems proaktiv in Abhängigkeit eines volatilen Produktionsprogramms geplant und deren Wirkung (bzw. Nutzen) vorab überprüft werden kann. Dazu können die bestehenden Plandaten der Grobplanung aus den PPS- bzw. ERP-Systemen herangezogen werden, mit denen die Fertigungsaufträge bis zum Planungshorizont erfasst werden können. In den bislang bekannten Planungssystemen erfolgt die Auftragssteuerung unter dem Primat der optimierten Ressourcenbelegung für ein definiertes Produktionssystem. Da jedoch die Gestaltung des Produktionssystems Gegenstand des zu erstellenden Reglermodells ist, muss ein geeignetes Verfahren zur Auflösung der Fertigungsaufträge entwickelt werden, auf dessen Basis die Einstellung der optimalen Systemkonfiguration erfolgt. Für die Planung, Überwachung und Kontrolle der Stückkosten sind dazu verschiedene Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung in die Methodik zu integrieren. (vgl. Kapitel 2.4)

Zur kurz- bzw. mittelfristigen Beurteilung des wirtschaftlichen Einsatzes der Produktionsressourcen kann das Verfahren der Maschinenstundensatzrechnung herangezogen werden. Hierzu muss in der Methodik ein Modell entwickelt werden, mit dem die eingesetzten Produktionsressourcen kostentechnisch abgebildet werden können. Investive Maßnahmen erfordern jedoch in der Praxis vorab eine Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit. Dazu müssen in der Methodik die Verwendung der Kostenvergleichsrechnung und der Amortisationsrechnung vorgesehen werden. Für die Analyse von Trade-offs von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb des Systems sind jedoch auch Darstellungen zum Verlauf der Stückkosten über den weiteren

Systemlebenslauf erforderlich. Aufgrund der Komplexität des Systems muss dies durch simulationsbasierte Ansätze unterstützt werden. Dazu muss das Produktionssystem in die Simulationsumgebung integriert und die Systemkonfiguration funktional abgebildet werden. In Analysen kann das dynamische Systemverhalten untersucht und alternative Szenarien hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden (vgl. Kapitel 2.4.4). Bekannte simulationsbasierte Ansätze fokussieren bislang auf die punktuelle Steuerung von Produktionssystemen über die Abbildung und Verifikation von Verbesserungsmaßnahmen. Ansätze für regelkreisbasierte Methoden zur Systemoptimierung sind bislang in der Literatur nicht bekannt.

3 Referenzmodell für Produktionssysteme

Nachdem in Kapitel 2 die Grundlagen zur Planung von Produktionssystemen und der Stand der Technik dargestellt wurden, beschäftigt sich dieses Kapitel gemäß den Ausführungen von Kapitel 1.3 mit dem Aufbau eines Referenzmodells für Produktionssysteme in der Serienfertigung.

Mit dem Referenzmodell sollen die Systemzusammenhänge abgebildet werden, so dass es für die Erfassung und Analyse von Zeit- und Kostenverteilungen genutzt werden kann. Das Referenzmodell soll dabei im Reglermodell zum Life Cycle Controlling hinterlegt werden, um alternative Produktionsszenarien simulationsbasiert abbilden und bewerten zu können (vgl. Kapitel 1.2).

Nach der Definition aus Kapitel 2.1 umfasst ein Produktionssystem neben der Fertigung auch noch die peripheren dispositiven Tätigkeiten, die zur autonomen Erfüllung der gestellten Produktionsaufgaben erforderlich sind. Daher müssen zur Systemoptimierung auch indirekte Bereiche berücksichtigt werden, die neben den Ressourcen mit direktem Fertigungsbezug zur Produkterstellung unterstützend eingesetzt werden.

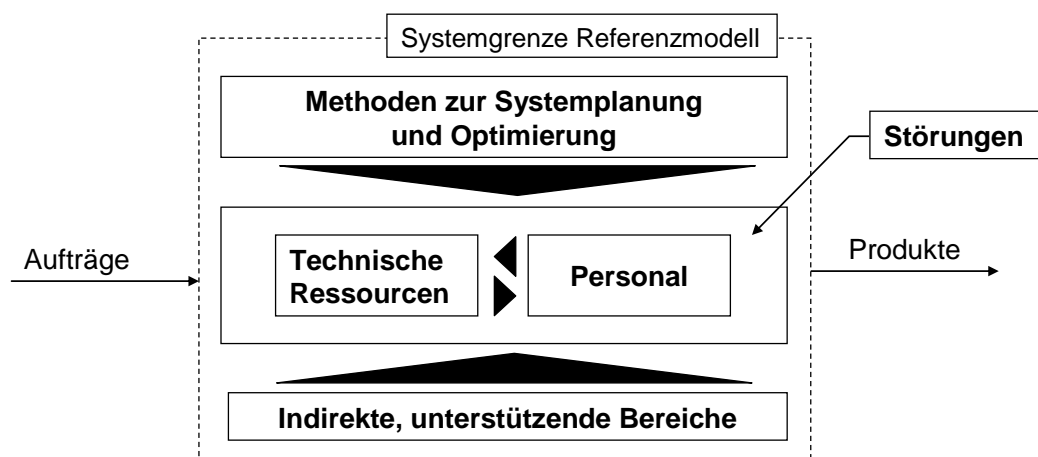


Abb. 3-1: Systemelemente des Referenzsystems

Die relevanten Systemelemente und Systemgrenzen für Produktionssysteme in der Serienfertigung sind daher entsprechend den Ergebnissen zur Untersuchung bestehender Ansätze zur Gestaltung von Produktionssystemen aus Kapitel 2.2.3 in Abb. 3-1 dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 festgestellt, sind insbesondere die Ressourcen Personal und Betriebsmittel als dominierende Größen für die kostentechnische Systembewertung relevant.

Die Produktion wird zudem durch indirekte Bereiche unterstützt, die in geeigneter Weise kostentechnisch abgebildet werden müssen. Das System wird in Anlehnung an die ganzheitlichen Produktionsansätze mit Methoden zur kontinuierlichen Systemplanung und -optimierung überlagert, um die Auswirkungen von Störungen zu beherrschen.

Ziel dieses Referenzmodells ist die formalisierte Beschreibung der Elemente des Produktionssystems, insbesondere in Bezug auf die für das Life Cycle Controlling erforderlichen Informations- und Interaktionsstrukturen. Hierfür kann auf die international standardisierte Sprachnotation der UML (Unified Modeling Language) zurückgegriffen werden. [OSE06] UML eignet sich dabei insbesondere als Grundlage für den Aufbau der erforderlichen betrieblichen Informationsstruktur, da mit der UML ein Referenzsystem für den strukturellen Aufbau und die allgemeinen Informationsbeziehungen von Systemen beschrieben werden kann. So existieren beispielsweise Bestrebungen, auch STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data), das auf die Austauschbeziehungen von Produktdatenmodellen fokussiert, in die UML-Notation zu überführen. [ISO10303], [OSE06] UML hat sich für den Entwurf und die Modellierung von produktionstechnischen Systemen in der Praxis zu einem weit verbreiteten Standard entwickelt. [BRA05], [BLZ05] Daher soll im Folgenden für die Entwicklung der Referenzstruktur auf die Systembeschreibung über Klassendiagramme zurückgegriffen werden, die als kompatible Notation für die Befüllung eines Simulationssystems eingesetzt werden kann.

Abb. 3-2 zeigt die grundlegende graphische Notation und die Bedeutungsinhalte der Syntax in einer Übersicht. Durch die Verknüpfung von Klassen können Beziehungen zwischen einzelnen Elementen untereinander beschrieben und ausgedrückt werden. Eine Klasse beinhaltet stets Objekte des gleichen Typs, denen neben der Bezeichnung bestimmte Eigenschaften (Attribute) zugeordnet sind, die sie von anderen Klassen unterscheidet. Des Weiteren kann eine Klasse u.U. Funktionen ausführen, die im unteren Teil der Notation dargestellt werden. Inhaltlich können durch die Verwendung der UML sowohl Vererbungsbeziehungen als auch hierarchische Systemzusammenhänge ausgedrückt werden. In Richtung des Pfeils wird eine Verallgemeinerung bzw. Generalisierung ausgedrückt. So bildet im dargestellten Beispiel von Abb. 3-2 die Klasse 2 einen Spezialfall der Klasse 1. Daher besitzt Klasse 2 über Vererbungsbeziehungen neben eigenen Eigenschaften auch alle Attribute und Funktionen von Klasse 1.

In umgekehrter Richtung bedeutet dies, dass entgegen der Pfeilrichtung eine Spezialisierung des Klasseninhalts erfolgt.

Zwischen den Klassen können jedoch auch Assoziationen bestehen. Im Falle, dass Klasse 3 einen Teil von Klasse 1 darstellt, wird von einer Aggregationsbeziehung (Leere Raute) gesprochen. Für den Fall, dass Klasse 4 nur durch die Existenz von Klasse 1 begründet wird, kann dies durch eine Komposition dargestellt werden (ausgefüllte Raute).

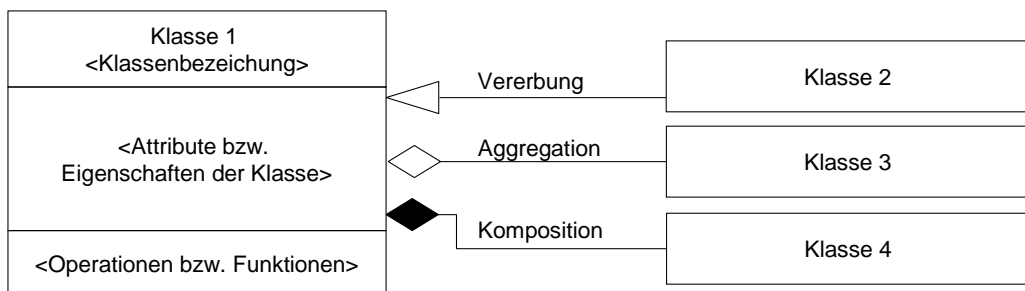


Abb. 3-2: Grundlagen der Klassendiagramme in UML [in Anlehnung an OSE06]

Über diese Syntax und die entsprechenden Notationen soll in Kapitel 3.1 zunächst in Anlehnung zu den Ausführungen aus Kapitel 2.2.1.2 die grundlegenden Aufgaben einer Leistungseinheit im Rahmen der betrachteten Systemgrenze modelliert werden. In Analogie zum Stuttgarter Unternehmensmodell (vgl. Kapitel 2.2.1.2) sollen die unterschiedlichen Systemebenen hinsichtlich ihrer Selbstähnlichkeit in Bezug auf die Funktion als Leistungseinheit dargestellt und gegliedert werden. Weiterhin wird das Produktionssystem unter Einbezug der relevanten Ressourcen und Daten aus einer hierarchischen Sicht heraus aufgebaut.

In Kapitel 3.2 kann dann die Modellierung der Struktur und der inhaltlichen Zusammensetzung der Auftragsinformationen erfolgen, mit der das Produktionssystem bzw. eine Leistungseinheit belastet wird.

In beiden Kapiteln bzw. Systemsichten müssen jedoch auch die zur Erfassung und Beschreibung dieser Ressourcen erforderlichen Daten nach ihrer Art und Quelle spezifiziert werden, um das Produktionssystem statisch und in seinem dynamischen Verhalten im Bezug auf die Zielfunktion beschreiben zu können.

3.1 Modellierung der Leistungseinheiten

Die Grundlage des Referenzsystems bildet die Leistungseinheit, über die der produktionstechnische Transformationsprozess erfolgt. Gemäß der UML-Notation stellt die Leistungseinheit eine Klasse dar, die mit verschiedenen Attributen (Eigenschaften) und Operationen (Funktionen) ausgestattet ist (vgl. Abb. 3-3). Kernaufgabe einer Leistungseinheit ist demnach die Ausführung von vorgegebenen Aufträgen (vgl. auch Kapitel 2.2.1.2). Diese ist über die Funktion *Auftrag_ausführen* modelliert. Inhaltlich sind dazu Auftragsinformationen zu erfassen, die als Ergebnis zurückgemeldet werden. Die Leistungseinheit muss dabei für das zu erstellende Reglermodell in eine informationstechnische Systemumgebung eingebunden werden, in der eine kontinuierliche Rückmeldung bezüglich der angeforderten Leistungserstellung (Ergebnis) erfolgt.

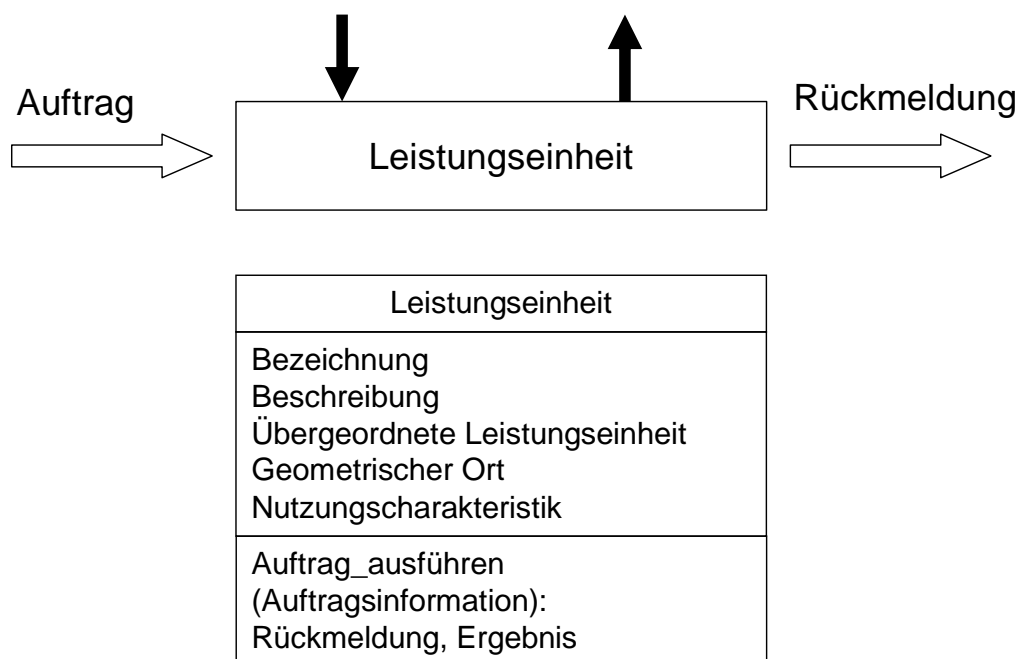


Abb. 3-3: Leistungseinheit mit Attributen und Funktionen

Zu den Attributen der Klasse *Leistungseinheit* zählt neben der Bezeichnung und der funktionalen Beschreibung auch die Angabe der übergeordneten Leistungseinheit. Auf diese Weise werden die hierarchische Gliederungsordnung innerhalb des Systems und die Stelle der Auftragsrückmeldung definiert. Neben diesen organisatorischen Aspekten sind jedoch auch die Eigenschaften, die sich aus dem operativen Einsatz der Leistungseinheit ergeben, für die Abbildung der Einheit in einem Referenzmodell von Interesse. Mit dem geometrischen Ort wird

in diesem Zusammenhang die Einsatzposition der Einheit innerhalb des Unternehmens beschrieben. Die Leistungseinheit weist bestimmte Nutzungsmerkmale auf, die über eine Nutzungscharakteristik erfasst werden.

Nach der Beschreibung der Ressourcenklassen mit den Attributen und Funktionen müssen für den Aufbau des Controllings die benötigten Datenquellen zur Abbildung und Beschreibung der Klassen spezifiziert werden. Dabei muss, gemäß der Funktion des Controllings (vgl. Kapitel 1.2) zwischen den Datenquellen zur Vorkalkulation (Planung) und der Nachkalkulation (Kontrolle) unterschieden werden. Die erforderlichen Daten und Datenquellen leiten sich aus den Ausführungen zu den betrieblichen Informationssystemen (vgl. Kapitel 2.3.1) und zur Wirtschaftlichkeit (vgl. Kapitel 2.4) ab. Für die Datenspezifikation der Klasse Leistungseinheit ergeben sich die hierzu erforderlichen Daten aus den Ausführungen in Kapitel 2.4.1.2. Diese sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Leistungseinheit			
Attribut	Datenbezeichnung	Datenquelle Vorkalkulation	Datenquelle Nachkalkulation
Nutzungscharakteristik	Nutzungsgrad	----	MDE, BDE
	Leistungsgrad	----	MDE
	Qualitätsgrad	----	MDE, BDE, QDE

Tabelle 3-1: Spezifikation und Erfassung der erforderlichen Daten der Leistungseinheit

Die Kennzahlen für den Nutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad der Betriebsmittel können durch die Auswertung und Verknüpfung der Haupt- und Nebenzeiten erfolgen. Diese Werte können vorkalkulatorisch nicht ermittelt werden, da die realen Einflüsse der verschiedenen Störfaktoren auf die Gesamtanlageneffektivität zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt sind. Für die Darstellung der Gesamtsystemleistung über einen Planungszeitraum müssen die Daten der Nutzungscharakteristik über den Zeitverlauf gesammelt und in aggregierten Summenübersichten ausgewiesen werden. Die Auswertung der Gesamtsystemleistung liefert damit Hinweise zur Identifikation von Leistungspotentialen, die im Rahmen von konkreten Verbesserungsmaßnahmen ausgeschöpft werden müssen.

3.1.1 Selbstähnliche Systemstrukturen

Über die Verwendung von Klassendiagrammen können die verschiedenen Ebenen des Stuttgarter Unternehmensmodells als spezielle Formen der allgemeinen Klasse der *Leistungseinheit* aufgefasst werden. Demnach bilden alle Ebenen des Unternehmensmodells zueinander selbstähnliche Klassen, da sie alle über Vererbungsbeziehungen die gleichen Eigenschaften wie die allgemeine Klasse *Leistungseinheit* besitzen. Somit sind beispielsweise die Klasse der *Produktionssysteme* oder auch ein einzelnes Betriebsmittel grundsätzlich Leistungseinheiten, die in ihrer konkreten Ausprägung jedoch unterschiedlich gestaltet sind. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 3-4 dargestellt.

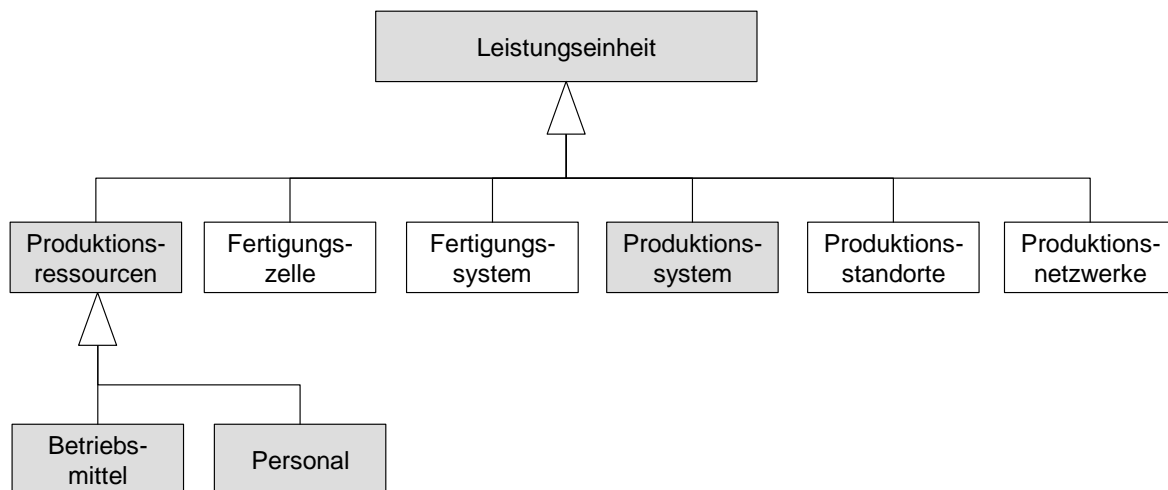


Abb. 3-4: Das Stuttgarter Unternehmensmodell als selbstähnliche Leistungseinheiten

Für den Aufbau des Referenzsystems sind innerhalb dieser Arbeit gemäß den einleitenden Ausführungen in diesem Kapitel nur die grau hinterlegten Klassen von Interesse, die als Bestandteile in der Referenzstruktur für ein Produktionssystem in der Serienfertigung berücksichtigt werden müssen.

3.1.2 Hierarchischer Systemaufbau

Hierarchisch gesehen besteht ein Produktionssystem mit Bezug zu den Ausführungen zur Systemtechnik aus Kapitel 2.2.1.2 aus 1...n Produktionsressourcen, die sich wiederum in die spezifischen Klassen der *Betriebsmittel* und des *Personals* gliedern. Die Klasse *Produktionssystem* enthält die vererbten Eigenschaften der Leistungseinheit sowie weitere Attribute, die zur

Kostenrechnung und für das Systemcontrolling erforderlich sind. In Abb. 3-5 ist die hierarchische Referenzstruktur für das betrachtete Produktionssystem schematisch dargestellt.

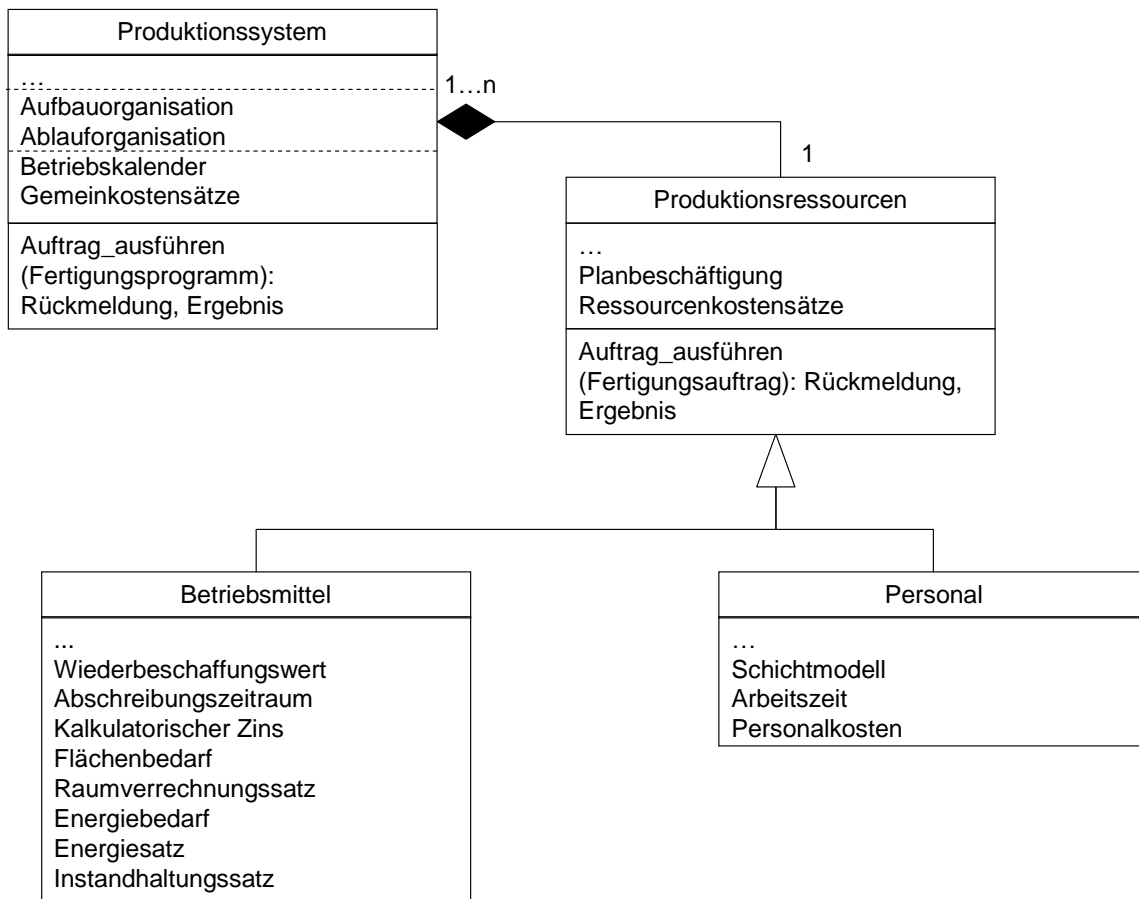


Abb. 3-5: Hierarchische Sicht der Referenzstruktur für ein Produktionssystem

In Kapitel 2.4 wurden dazu die Kostenrechnung und die erforderlichen Daten erläutert, die im Referenzmodell Eigenschaften der jeweiligen Klassen darstellen. So sind in der Klasse *Produktionssystem* neben den Eigenschaften zur Aufbau- und Ablauforganisation innerhalb des Produktionssystems auch Informationen zum Betriebskalender und zu den Gemeinkostensätzen hinterlegt. Auf der Ebene des Produktionssystems erfolgt die Funktion *Auftrag_ausführen* und die *Rückmeldung* aufgrund des vorliegenden Fertigungsprogramms.

Die Ablauf- und Aufbauorganisation wird durch die vorhandenen Produktionsressourcen gebildet und festgelegt. In Tabelle 3-2 sind die erforderlichen Daten für die Klasse *Produktionssystem* hinsichtlich der Datenquellen dargestellt.

Über die Aufbauorganisation muss das System mit den Ressourcen, sowie deren Zuordnung und hierarchischen Gliederung abgebildet werden. Dazu sind jedoch keine Daten aus dem

laufenden Systembetrieb erforderlich, es müssen vielmehr die Abhängigkeiten und Beziehungen der Ressourcen untereinander dargestellt werden. Die Informationen müssen aus dem realen System in das Referenzmodell übernommen werden, wobei insbesondere verkettete Ressourcenabhängigkeiten von Interesse sind. Dieser Fall tritt z.B. auf, wenn für den Einsatz einer Ressource bestimmte Nebenbedingungen erfüllt sein müssen oder die Verwendung einer Ressource den Einsatz weiterer Elemente impliziert.

Produktionssystem		
Attribut	Datenbezeichnung	Datenquelle
Aufbauorganisation	Ressourcenzuordnungen	Arbeitsvorbereitung
Ablauforganisation	Arbeitsschritte, Reihenfolge	Arbeitspläne
Betriebskalender	Betriebstage	PPS

Tabelle 3-2: Spezifikation der erforderlichen Daten in der Klasse Produktionssystem

Die Ablauforganisation der erforderlichen Kernprozesse wird über die jeweiligen Arbeitspläne vorgegeben. In diesen sind die erforderlichen Ablaufschritte und Ressourcenabfolgen zur Fertigung der Produkte vorgegeben (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Abbildung relevanter peripherer Prozesse (Werkzeugkreisläufe, Materialbereitstellung, Prüfprozesse etc.) kann an dieser Stelle nur durch Beobachtungen des realen Systems oder aus den Fertigungsunterlagen der Arbeitsvorbereitung entnommen werden. Diese Prozesse sind dann als relevant anzusehen, wenn durch sie ein signifikanter Zeit- und/oder Kostenverzehr stattfindet. Für diese Prozesse ist im Einzelfall über eine Aufwand-Nutzenabschätzung zu beurteilen, ob die Abbildung im Referenzmodell sinnvoll ist.

Als weitere Eigenschaft des Produktionssystems sind Daten bezüglich des systemspezifischen Betriebskalenders erforderlich. Damit wird die Anzahl der zur Verfügung stehenden Betriebstage des Systems innerhalb des betrachteten Planungszeitraums festgelegt.

Für das Systemcontrolling sind weiterhin Informationen bezüglich der bereitgestellten Produktionsressourcen erforderlich. Über eine Zusammenstellung der vorhandenen Systemressourcen nach Art und Anzahl kann so die zur Bearbeitung der Aufträge zur Verfügung stehende Kapazität ausgewiesen werden. Dazu sind gemäß der Definition aus Kapitel 2.2.2 die

Ressourcen Betriebsmittel und Personal zu erfassen. Die Ressource Personal umfasst die direkten und indirekten Bereiche. Da die Klasse *Produktionsressourcen* die Verallgemeinerung für die Betriebsmittel und das Personal darstellen, wird in ihr neben den vererbten Attributen an dieser Stelle auch die Information bezüglich der Planbeschäftigung und der Ressourcenkostensätze hinterlegt. Die unterschiedlichen Daten zur Ermittlung der Kostensätze sind dann in den jeweiligen Ressourcenklassen hinterlegt. Die Funktion *Auftrag_ausführen* erfolgt für diese Klasse über die Ebene der Fertigungsaufträge (vgl. Ausführungen in Kapitel 2.3.1).

Produktionsressourcen		
Attribut	Datenbezeichnung	Datenquelle
Planbeschäftigung	Geplante Systembelegungszeit	PPS
Ressourcenkostensätze	Kostensätze Betriebsmittel, Kostensätze Personal	Rechnungswesen

Tabelle 3-3: Spezifikation der erforderlichen Daten in der Klasse *Produktionsressourcen*

Die hierzu erforderlichen Daten zeigt Tabelle 3-3. In der Klasse der *Produktionsressourcen* müssen diese zunächst hinsichtlich der geplanten Einsatzzeiten und in ihren Kostensätzen beschrieben werden. Die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Planbeschäftigung und der Ressourcenkostensätze wurde dazu bereits in Kapitel 2.4.1.1 beschrieben. Die kostenoptimale Herstellung von Produkten erfordert jedoch eine effiziente Nutzung der Systemressourcen. Um Schwachstellen und Leistungsverluste im Gesamtsystem identifizieren zu können, muss dazu die Nutzungscharakteristik jeder einzelnen Ressource erfasst und ausgewiesen werden (vgl. die Ausführungen zur Systemtechnik in den Kapitel 2.2.1.2 und 2.3.4). Die erforderlichen Daten zur Kalkulation der Ressourcenkostensätze sind dabei je nach eingesetzter Ressourcenklasse verschieden und müssen daher in den folgenden Darstellungen für das Referenzmodell noch weiter spezifiziert werden. Die Klasse der *Betriebsmittel* soll neben den Maschinen auch andere kostenrelevante technische Ressourcen umfassen, sofern sie über eigenständige Kostensätze und nicht über die Gemeinkosten erfasst werden.

Diese Klasse enthält demnach gemäß Tabelle 3-4 über die Vererbungsbeziehungen mit der Klasse der *Leistungseinheit* neben den Attributen zur allgemeinen Beschreibung auch eine Nutzungscharakteristik. Durch die Arbeitsvorbereitung bzw. die Arbeitspläne werden dazu

Planzeiten für die Auftragsbearbeitung vorgegeben. Die geplanten Ausführungszeiten ergeben sich aus den Programmlaufzeiten sowie den im Rahmen der Zeitwirtschaft ermittelten Haupt- und Nebenzeiten. Entstehende Brachzeiten (z.B. durch Störungen oder Verkettungsverluste) können jedoch in der Regel nicht als Plangrößen ausgewiesen werden. Dies liegt nicht zuletzt in der Komplexität der Wirkbeziehungen innerhalb des Systems begründet. Dennoch entstehen diese Zeiten unweigerlich während des Produktionsprozesses und können daher erst über die Systeme der BDE bzw. MDE erfasst werden. Ähnliches gilt für die Planung und Erfassung qualitätsbedingter Verlustzeiten durch Ausschuss und Nacharbeit. In der Planung der Serienproduktion wird idealisiert von einer Null-Fehler Produktion ausgegangen.

Betriebsmittel			
Eigenschaft	Datenbezeichnung	Datenquelle Vorkalkulation	Datenquelle Nachkalkulation
Nutzungs- charakteristik	Hauptzeiten	Arbeitsplan	MDE
	Nebenzeiten (Rüsten etc.)	Arbeitsplan	MDE, BDE
	Brachzeiten	----	MDE
	Nacharbeitszeiten	----	BDE, MDE, QDE
Wiederbeschaffungswert		Rechnungswesen	
Abschreibungszeitraum		Betriebsmittelplanung, Rechnungswesen	
Kalkulatorischer Zins		Rechnungswesen	
Flächenbedarf		Betriebsmittelplanung, Rechnungswesen	
Raumverrechnungssatz		Rechnungswesen	
Energiebedarf		Rechnungswesen	
Energiesatz		BAB	
Instandhaltungssatz		Rechnungswesen	

Tabelle 3-4: Spezifikation der erforderlichen Daten in der Klasse Betriebsmittel

Daher dient die Auswertung der Qualitätsdaten in der Nachkalkulation der Identifikation von Verbesserungspotentialen, die sich aus der Reduktion des entstehenden (Mehr-)Aufwands durch Nacharbeiten oder Ausschussteile ergibt. Die unproduktiven Zeitanteile verursachen

Kostensteigerungen, die im Rahmen der Rationalisierung gemäß dem TPM-Konzept als Verschwendung (=Verbesserungspotentiale) klassifiziert werden können (vgl. Kapitel 2.4.3.1).

In der Klasse der *Betriebsmittel* sind weiterhin die einzelnen Bestandteile der Ressourcenkostensätze als Attribute hinterlegt. Durch diese Art der Anordnung lassen sich auch über das Referenzsystem alternative Systemkonfigurationen im Rahmen von Verbesserungsmaßnahmen überprüfen, da neue Ressourcen durch die Attribute dieser Klasse kostentechnisch vollständig beschrieben werden und somit modular in das Referenzsystem integriert und/oder entfernt werden können. Die Erfassung der erforderlichen Kostendaten kann zumeist auf der Grundlage der im Rechnungswesen verfügbaren Daten geschehen.

Die Spezifikation der erforderlichen Daten bezüglich der Ressource Personal kann aus der PPS und den Arbeitsplänen entnommen werden. Im Referenzmodell müssen in der Klasse *Personal* die Schicht- und Arbeitszeitmodelle aus der PPS hinterlegt werden, um die zur Verfügung stehende Personalkapazität über den Planungszeitraum zu erfassen. Da das Personal zur Maschinenbedienung zwingend erforderlich ist, entstehen an dieser Stelle aufbau- und ablauforganisatorische Systemverknüpfungen. Die Personalverfügbarkeit hat damit u.U. Auswirkungen auf die Ablaufarten anderer Ressourcen. Die Klasse *Personal* erhält über die Vererbungsbeziehungen auch das Attribut der Nutzungscharakteristik. Zwar bestehen zumeist Plandaten aus der Arbeitsvorbereitung, die jedoch aufgrund bestehender Gesetze nur selten in den einzelnen Zeitarten nachgehalten werden dürfen. In der Praxis wird für das Personal davon ausgegangen, dass es über die gesamte Schicht innerhalb der Systemgrenzen verfügbar ist und auf die Kostenstelle des Systems verbucht wird.

Personal			
Attribut	Datenbezeichnung	Datenquelle Vorkalkulation	Datenquelle Nachkalkulation
Schichtmodell	Schichtanzahl	PPS	PPS, PDE
Arbeitszeit	Schichtdauer	PPS	PDE
Personalkosten	Kostensatz Personal	Rechnungswesen	Rechnungswesen

Tabelle 3-5: Spezifikation der erforderlichen Daten in der Klasse Betriebsmittel

Das Einsatzpotential des Personals wird des Weiteren jedoch indirekt über die Nutzungscharakteristik der Maschinen abgebildet.

Die vorkalkulatorischen Plandaten für das Personal werden aus den Arbeitsplänen bzw. dem betrieblichen Personalverwaltungssystem generiert. Über den Fertigungsfortschritt werden diese Daten über die Personaldatenerfassung (PDE) zeitlich fortgeschrieben und weitergeführt. Auf diese Weise kann die tatsächliche Anwesenheitszeit des Personals im Produktionssystem erfasst werden. Über die Anmeldung der Auftragsabarbeitung an den Maschinen kann zudem eine personenbezogene Identifikation der Maschinenbedienung über die MDE im Rahmen der Nachkalkulation durchgeführt werden. Die erforderlichen Datenquellen sind zusammenfassend in Abb. 3-5 dargestellt.

3.2 Modellierung der Auftragsinformationen

Die Ausführung der Produktion erfolgt über das Abarbeiten von Aufträgen. Diese Funktion wurde als zentrale Aufgabe einer Leistungseinheit bereits zuvor definiert. Daher muss an dieser Stelle die Klasse der *Auftragsinformationen* in ihrer Zusammensetzung für das Referenzsystem festgelegt und beschrieben werden. Wie zuvor dargestellt, beinhalten die Klassen *Leistungseinheit*, *Produktionssystem* und *Produktionsressourcen* jeweils die Operation (Funktion) *Auftrag_ausführen*, wobei dann eine Rückmeldung mit Bezug auf das geplante Fertigungsprogramm bzw. die eingelasteten Fertigungsaufträge erfolgt. Gemäß den grundlegenden Ausführungen zum Auftragsmanagement aus Kapitel 2.3.1 dienen die Arbeitspläne als Grundlage für die erforderlichen Auftragsinformationen, die zum Controlling des Produktionssystems benötigt werden.

Die Arbeitspläne enthalten neben den erforderlichen Arbeitsschritten auch die einzusetzenden Ressourcen sowie die Plandaten für die zu erwartenden Ausführungszeiten. Aus den Plänen ergibt sich auch das Mann-Bedienverhältnis für die Nutzung der Betriebsmittel.

Für die Vorkalkulation der Systemlasten- und der Systemleistung müssen die einzusetzenden Ressourcen (Betriebsmittel und Personal) jedoch im Rahmen der Fertigungsaufträge konkretisiert werden, um eine genaue Kalkulation der erforderlichen Kapazitäten und der entstehenden Kosten zu ermöglichen. Dabei besteht ein Fertigungsauftrag aus genau einem Arbeitsplan, der um diese Eigenschaften erweitert wird.

Das zugrunde gelegte Fertigungsprogramm besteht aus Bedarfen, die hinsichtlich der benötigten Teile nach Menge und Zeit spezifiziert werden müssen. Die Bedarfe orientieren sich wiederum an den zugrunde gelegten Arbeitsplänen. Das entsprechende Klassendiagramm der

Auftragsinformationen ist zusammenfassend in Abb. 3-6 dargestellt. Die einzelnen Attribute der unterschiedlichen Klassen müssen zur Vollständigkeit noch hinsichtlich der Datenquellen näher beschrieben werden.

Die Eigenschaften der Klasse der *Arbeitspläne* lassen sich direkt aus den Dokumenten entnehmen und müssen daher bezüglich ihrer Quelle nicht weiter spezifiziert werden (vgl. Kapitel 2.3.3).

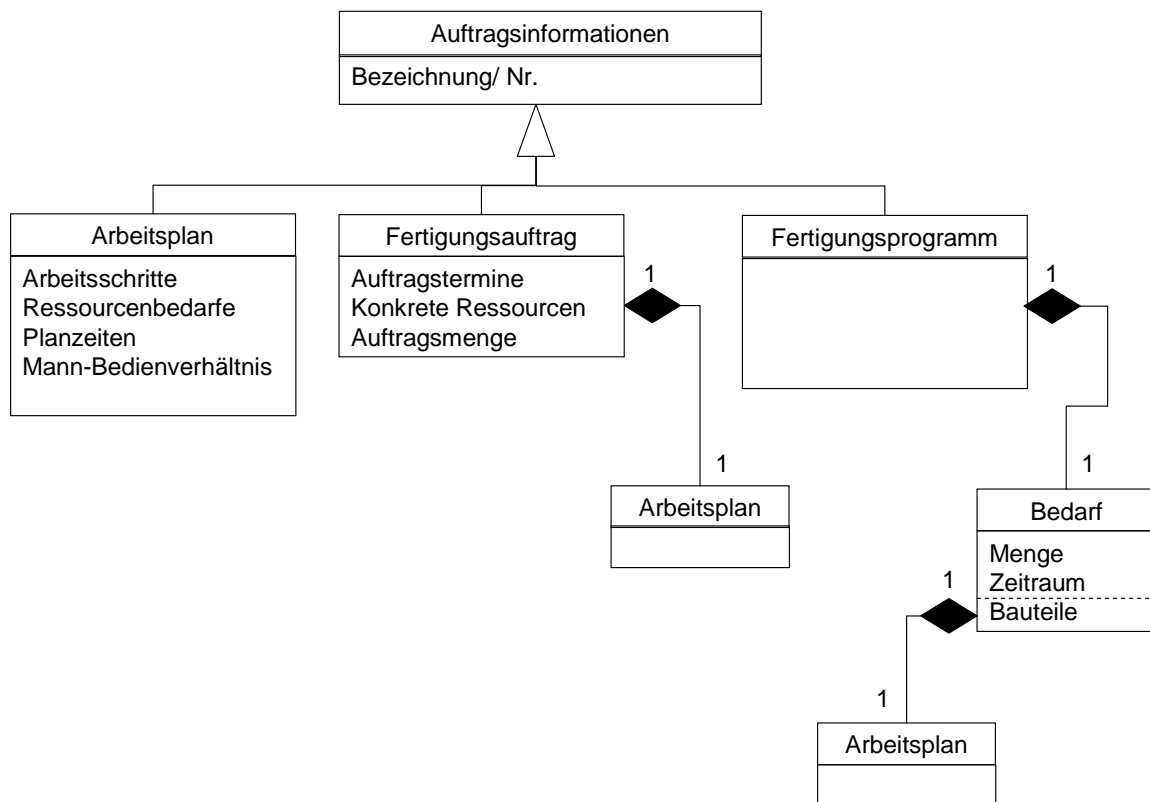


Abb. 3-6: Struktur der Auftragsinformationen

Die erforderlichen Daten bezüglich der Klassen *Fertigungsauftrag* sowie *Fertigungsprogramm* können gemäß den Ausführungen von 2.3.1 aus den in Tabelle 3-6 dargestellten Quellen bezogen werden.

Da in den Arbeitsplänen zumeist die Betriebsmittel auf Gruppenebene ausgewiesen sind, müssen die konkret einzusetzenden Maschinen in der Klasse der *Fertigungsaufträge* spezifiziert werden, um die erforderlichen Kapazitäten und Kosten zu bestimmen. Die erforderlichen Daten für die Fertigungsaufträge können somit vorkalkulatorisch aus der Arbeitsvorbereitung bezogen werden, während die Nachkalkulation der tatsächlichen Systemleistung über die BDE erfolgen kann.

Das Eigenfertigungsprogramm wird durch die Bestimmung der Bedarfe für den betrachteten Planungszeitraum festgelegt. Daher muss im Referenzmodell die Klasse der *Bedarfe* hinsichtlich der erforderlichen Eigenschaften und Datenquellen spezifiziert werden. Das Controlling der langfristigen Bedarfsplanung über den Planungszeitraum erfolgt über die Daten der PPS. Damit ist das Produktionssystem in Bezug auf die einzelnen Elemente innerhalb der festgelegten Systemgrenzen in einem Referenzsystem vollständig beschrieben.

Personal			
Klasse	Attribut	Datenquelle Vorkalkulation	Datenquelle Nachkalkulation
Fertigungsauftrag	Termine	Arbeits- vorbereitung	BDE
	Konkrete Ressourcen	Arbeits- vorbereitung	BDE
	Auftragsmengen	Arbeits- vorbereitung	BDE
Bedarfe	Bedarfmengen	PPS	PPS
	Zeitraum	PPS	PPS
	Bauteile	PPS, Stücklisten	PPS

Tabelle 3-6: Spezifikation der erforderlichen Daten in den Klassen Fertigungsauftrag und Fertigungsprogramm

Über die Modellierung des Systems in der Beschreibungssprache UML wurden dazu Klassendiagramme entwickelt, in denen sich das Stuttgarter Unternehmensmodell mit den einzelnen Hierarchieebenen vollständig modellieren und formal hinsichtlich der jeweiligen Nutzungscharakteristika und der entstehenden Kosten beschreiben lässt. Die Klassen enthalten auf jeder Ebene spezifische und vererbte Attribute und Funktionen, mit denen sie hinsichtlich ihrer Aufgaben und Interaktion mit anderen Klassen im Produktionssystem dargestellt werden können. Über Vererbungsbeziehungen erhalten die einzelnen Klassen zudem alle Eigenschaften der Klasse der *Leistungseinheiten*, so dass auf diese Weise eine Systematik von Klassen mit selbstständigen Systemstrukturen und -elementen auf allen Ebenen der Systemhierarchie entsteht. Durch die genaue Spezifikation der erforderlichen Daten und Datenquellen kann das

entwickelte Referenzsystem an die entsprechenden betrieblichen Informationssysteme zur Erfassung und Abbildung der realen Systemzustände angekoppelt werden.

Das Referenzsystem dient weiterhin als Basis für die Entwicklung des Reglermodells zum Life Cycle Controlling, dessen Entwicklung nunmehr im folgenden Kapitel dargestellt wird.

4 Life Cycle Controlling von Produktionssystemen

Im vorherigen Kapitel wurde das Referenzmodell aufgebaut, mit dem das Produktionssystem in der Serienfertigung über den zeitlichen Verlauf kontinuierlich erfasst und kostentechnisch abgebildet werden kann. Das Modell stellt einen zentralen Baustein zur Erfassung und Bewertung der Systemelemente dar, auf dem nun gemäß der Aufgabenstellung eine Methodik zum Life Cycle Controlling entwickelt wird.

Dazu muss ein Regler entwickelt werden, mit dem ein Produktionssystem kontinuierlich über den Lebenslauf an die zu fertigenden Aufträge angepasst werden kann, so dass die Produktion unter minimalen Stückkosten erfolgt.

Für die Zielsetzung und Aufgabenstellung der Arbeit (vgl. Kapitel 1.2) stellen die Aufträge und die Betriebsinformationen die Eingangsgrößen des Reglers dar. Hierzu muss, wie bereits in Kapitel 2.3.1 dargestellt, die erforderliche Systemkapazität für den betrachteten Planungszeitraum bestimmt werden. Dazu muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Aufträge in ressourcenbezogene Kapazitätsbelastungen überführt werden können.

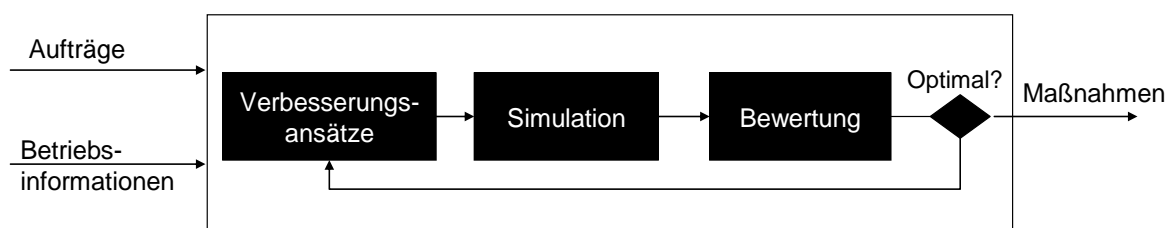


Abb. 4-1: Regler zum Life Cycle Controlling

Auf Basis der Belastungssituation soll dann die Ableitung von Maßnahmen zur Systemoptimierung erfolgen. Die Bewertung der Strategien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtsystem werden dann in Simulationsläufen untersucht. Dieses Verfahren wird für alle strategischen Ansätze durchlaufen, bis der strategisch/wirtschaftlich optimale Handlungsbedarf ermittelt ist. Für die ausgewählten Handlungsstrategien sind dann konkrete Maßnahmen auszuarbeiten, über die eine Optimierung der Systemkonfiguration operativ erfolgt. Der grundsätzliche Aufbau des Reglers ist noch einmal zusammenfassend in Abb. 4-1 dargestellt. Die

Lebenslauforientierung der Methodik ergibt sich in Anlehnung an die Ausführungen aus Kapitel 2.4.3 durch die übergreifende Betrachtung unterschiedlicher Systemfunktionen und Kapazitätssituationen innerhalb des betrachteten Planungszeitraums. Dabei können die verschiedenen temporären Konfigurationen und Belastungszustände als einzelne funktionale Nutzungsphasen charakterisiert werden, über die eine ganzheitliche Optimierung (Trade-offs) erfolgt. Die einzelnen Schritte der Regelung müssen in den folgenden Kapiteln detailliert ausgearbeitet werden, bevor sie in einer regelkreisbasierten Methodik zusammengeführt werden können.

4.1 Auflösung der Fertigungsaufträge

Aus der Analyse von Defiziten der bestehenden Informationssysteme (vgl. Kapitel 2.3.1) können die aus der PPS bereitgestellten Daten nur für die Bildung bis zur Detaillierungsebene der Fertigungsaufträge bzw. des Sekundärbedarfs genutzt werden. Im Hinblick auf die zu generierende optimale Systemkonfiguration muss daher ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die zur Abarbeitung der Aufträge erforderliche Systembelastung mit den vorhandenen Systemressourcen und -kapazitäten abgeglichen werden kann. In Abb. 4-2 ist dieser Sachverhalt zur Erfassung der erforderlichen Ressourcenkapazität im grau hinterlegten Feld graphisch dargestellt.

Grundlage der Planung sind die aus der PPS bereitgestellten Daten der Grobplanung. Die im Planungshorizont der PPS eingestellten Aufträge, bilden die Grundlage für die weitere Kalkulation des Life Cycle Controllings. Über die Stücklistenauflösung wird in der PPS die Planung der Eigenfertigung und der Fertigungsaufträge festgelegt. Für das Life Cycle Controlling ist dann jedoch nicht mehr die Feinplanung und die Ausführungsplanung innerhalb des Produktionssystems relevant, sondern vielmehr die Betrachtung der erforderlichen Ressourcenkapazitäten. Das Life Cycle Controlling sucht an dieser Stelle die optimale Systemkonfiguration zur Abarbeitung der vorliegenden Fertigungsaufträge. Für die Bearbeitung der einzelnen Teile sind verschiedene Bearbeitungsverfahren und Arbeitsgänge erforderlich. Diese sind in den Arbeitsplänen festgelegt und hinsichtlich der erforderlichen Systemressourcen und Vorgabezeiten beschrieben. Mit den Auftragszahlen aus dem Fertigungsprogramm und den Arbeitsplänen kann daher eine Belegung der Maschinen des Produktionssystems erfolgen. Es ist jedoch zu beachten, dass gerade in der Serienproduktion häufig mehrere technologisch ähnliche oder gleiche Maschinen zur Bearbeitung eines Auftrags bereitstehen. In der Praxis erfolgt die

Verteilung des Kapazitätsbedarfes auf die Maschinen zumeist aufgrund festgelegter Prioritätsregeln, wobei sich die Maschinenzuweisung z.B. an der kürzesten Durchlaufzeit für einen Auftrag orientiert. Somit kann die Zuweisung von Aufträgen auf die Fertigungseinrichtungen als weitgehend gegeben angesehen und die erforderliche Sollkapazität der Anlagen ermittelt werden.

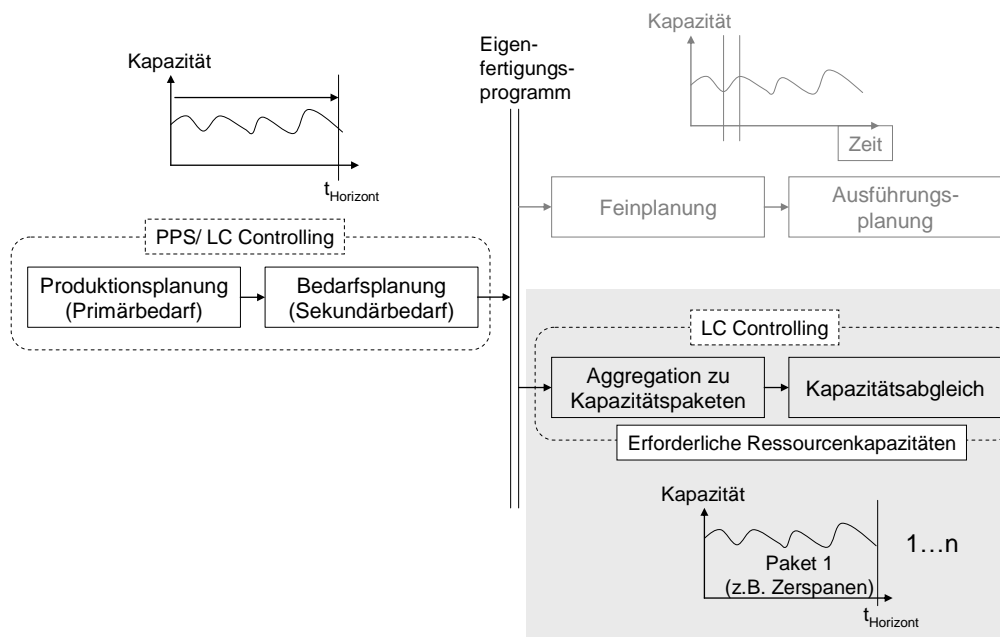


Abb. 4-2: Auflösung der Fertigungsaufträge in Kapazitätspakete

Dies geschieht, indem die geforderte Stückzahl mit der Auftragszeit gemäß Arbeitsplan multipliziert wird. Die erforderlichen Auftragszeiten können über die Bearbeitungs- und Rüstzeiten aus den Arbeitsplänen entnommen werden. (vgl. Kapitel 2.3.3)

Den Ausführungen von Kapitel 2.4.1.2 folgend, sind jedoch über den OEE zusätzlich noch die technischen Verlustzeiten der Maschinen für die Kalkulation der erforderlichen Kapazitäten zu berücksichtigen. Diese können als statistische Größen aus der BDE ermittelt (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2) und für eine Vorkalkulation in der Serienfertigung vereinfacht prozentual aufgeschlagen werden. Der OEE beinhaltet die Nutzungs-, Qualitäts- und Leistungsverluste. Für Produktionssysteme, die sich nicht im Serienanlauf sondern in einem eingeschwungenen Systemzustand befinden, kann dieser Faktor als statistische Größe aus Betriebsdaten der vorherigen Perioden gebildet werden. Auf diese Weise werden die dynamischen Störgrößen, die während des Fertigungsprozesses zu erwarten sind, bereits zu diesem Zeitpunkt in der Kalkulation

berücksichtigt. Die zur Fertigung des definierten Auftragsvolumens erforderliche Maschinennutzungszeit T_N ergibt sich dann als Summe aller Auftragszeiten, multipliziert mit einem prozentualen Faktor p_v zur Abbildung der Störgrößen. Die ausgewiesene Nutzungszeit enthält damit die neben den reinen Hauptzeiten zusätzlich anfallenden unproduktiven Zeitanteile der Ressourcennutzung.

$$T_N = \left(\sum_1^L t_r + \sum_1^m t_e \right) \cdot (1 + p_v) \quad (4-1)$$

Über diese Berechnung kann die erforderliche Kapazität für jedes Betriebsmittel im Produktionssystem ermittelt werden. In Abb. 4-3 ist dieser Sachverhalt graphisch dargestellt.

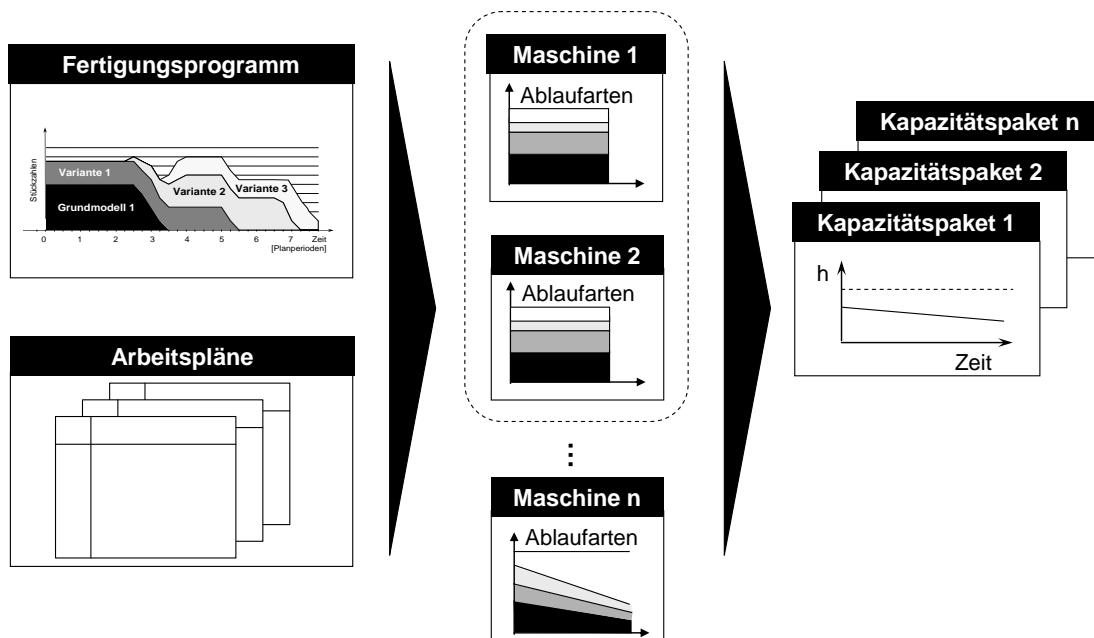


Abb. 4-3: Darstellung der erforderlichen Betriebsmittelkapazitäten

Die erforderlichen Kapazitäten auf technologisch gleichen Maschinen können dabei in Kapazitätspaketen zusammengefasst werden. Auf diese Weise entstehen Arbeitspakete, mit denen summarische Kapazitätsübersichten für gleichartige Maschinengruppen erstellt werden können.

Durch die Transformation entsteht eine klassenorientierte Ressourcensicht, mit der Fertigungsaufträge im Sinne einer späteren Systemoptimierung gegliedert werden können. Die Kapazitätspakete bilden daher die Grundlage für die Optimierungsschleifen. Inhaltlich beschreiben diese Pakete eine summarische Soll-Kapazität von gleichartigen Maschinen.

Hierzu werden jeweils die einzelnen Zeitenarten der Anlagen zusammengefasst und kumuliert dargestellt. Demnach ergibt sich die Hauptnutzungszeit des Kapazitätspaketes als Summe aller Einzelbearbeitungszeiten der zugeordneten Betriebsmittel. Diese kann als Produktivzeit bezeichnet werden, denn durch sie wird die Wirkleistung des Systems beschrieben (Kapitel 2.4.1.2). In die Berechnung der erforderlichen Kapazität gehen dann noch die Rüstzeiten sowie die technischen Verluste ein, die als Scheinleistung bzw. Verlustleistung beschrieben werden können.

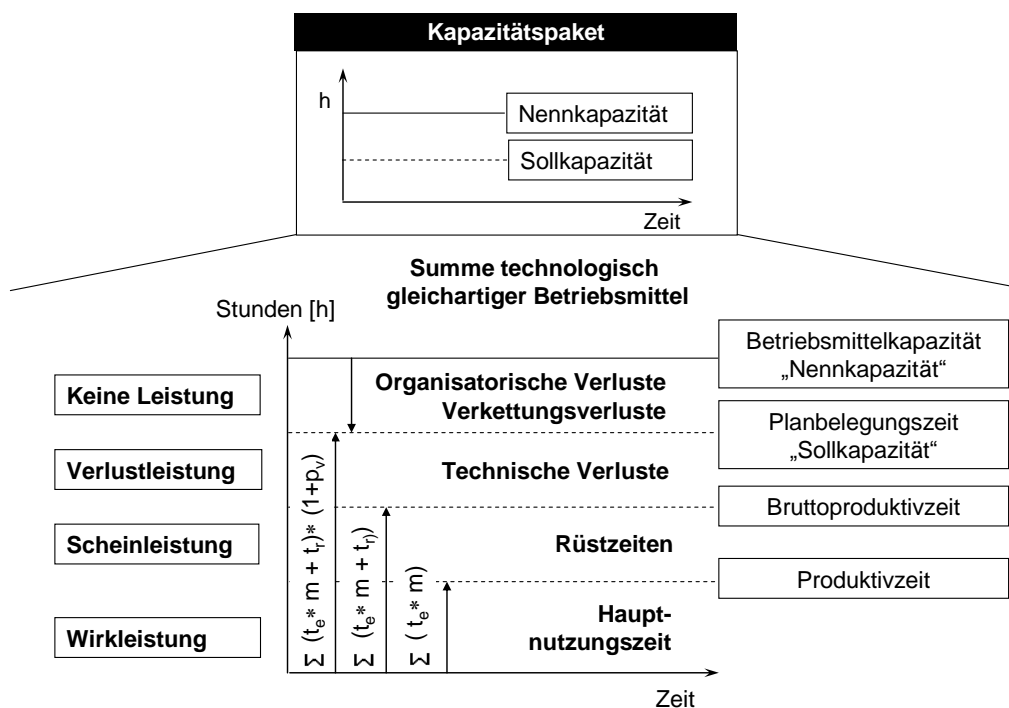


Abb. 4-4: Zeitliche Gliederung der erforderlichen Gesamtkapazität

Wird von der summarischen (Gesamt-) Betriebsmittelkapazität (Nennkapazität) die Planbelegungszeit (als Summe der Wirk-, Schein- und Verlustleistung) abgezogen, so lässt sich als Differenz eine Zeit ausweisen, in der keine Leistung erbracht wird. In dieser Zeit entstehen organisatorisch bedingte Warte- und Leerzeiten an den Betriebsmitteln. Abb. 4-4 zeigt diesen Sachverhalt in einer Übersicht. Mit dieser Systematik werden die Verlustzeiten in Rüstzeiten, technische Verluste und organisatorische Verluste gegliedert. Die Analyse der unterschiedlichen Zeitanteile bietet dann die Grundlage für Systemoptimierungen.

4.2 Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen

Auf der Basis der Zeitübersichten für die Kapazitätspakete müssen im Folgenden strategische Ansätze für geeignete Systemanpassungen abgeleitet werden. Dazu sind in einem ersten Schritt die kritischen bzw. potentialbehafteten Kapazitätspakete auszuwählen, bei denen eine Optimierung sinnvoll erscheint. In einem zweiten Schritt sind dann für diese Pakete potentielle Handlungsstrategien zu identifizieren, mit denen (möglicherweise) eine Reduktion der Stückkosten erreicht werden kann. Die Wirksamkeit strategischer Ansätze muss in nachfolgenden Simulationsläufen verifiziert werden.

4.2.1 Auswahl kritischer und potentialbehafteter Kapazitätspakete

Zur Identifikation und Auswahl kritischer bzw. potentialbehafteter Arbeitspakete werden die summarisch ermittelten Soll-Kapazitäten der jeweiligen Nennkapazität eines Kapazitätspaketes über den betrachteten Zeithorizont gegenübergestellt. Der betrachtete Zeithorizont umfasst dabei stets alle zum Betrachtungszeitpunkt bekannten Aufträge und ggf. prognostizierte Auftragsentwicklungen für die Zukunft. Nur ein möglichst langfristiger Betrachtungszeitraum über mehrere Perioden mit einer großen Anzahl von Aufträgen ermöglicht eine nachhaltige Systemoptimierung. Zudem wirkt das große Auftragsvolumen über die Zeit quasi als „Dämpfungsglied“, so dass sich nur langfristig erfolgreiche Verbesserungsmaßnahmen für die praktische Umsetzung auch wirtschaftlich durchsetzen. In der Betrachtung der Systemkapazitäten über den Planungszeitraum sind dabei die im Folgenden dargestellten Entwicklungen denkbar. Grundsätzlich kann die Nennkapazität mit der erforderlichen Soll-Kapazität übereinstimmen oder abweichen. Im Falle von Abweichungen ist aus analytischer Sicht denkbar, dass die zur Abarbeitung der Aufträge erforderliche Soll-Kapazität unterhalb oder über der Nennkapazität liegt. Arbeitspakete, bei der die Soll-Kapazität die Nennkapazität übersteigt, sind als kritische Pakete anzusehen. Diese Fälle erfordern zwingend eine Systemadaption, um die Kundenaufträge zeitgerecht zu bearbeiten. Im umgekehrten Fall beinhalten Minderauslastungen gemäß den Gesetzmäßigkeiten der Systemtechnik (vgl. Kapitel 2.3.4) Potentiale zur Optimierung.

Zur Beurteilung der Kapazitätspakete muss jedoch der Bedarfsverlauf über den Planungszeitraum berücksichtigt werden. Demnach sind hierzu die Fälle ansteigender oder abnehmender Kapazitätsbedarfe über die Zeit zu untersuchen. In der Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Serienfertigung von Aufträgen eine planerische Vorlaufzeit beinhaltet und dass ein

Produktionssystem in der Regel derart konfiguriert ist, dass die aktuell geforderten Aufträge durch das System kapazitiv beherrscht werden können. Aus diesen Prämissen ergibt sich, dass die Soll-Kapazitäten die Nennkapazitäten zu Planungsbeginn nicht übersteigen, da ansonsten der Produktionsbedarf nicht erfüllt werden kann. Dieser Fall sei daher für die Planungsmethodik ausgeschlossen.

Zusammengefasst ergibt sich die in Abb. 4-5 dargestellte Morphologie von möglichen Kapazitätsprofilen für die Pakete. Aus der Charakteristik der Kapazitätsbelastung können dann strategische Handlungsoptionen abgeleitet werden. Dabei stellen die Kapazitätspakete in Fall 1 und 2 Belastungssituationen dar, in denen durch alternative Systemkonfigurationen Verbesserungspotentiale realisiert werden „könnten“.

Fall 1 ist durch Bemühungen im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserungsprozesse gekennzeichnet, die erforderliche Systemleistung durch einen rationelleren Ressourceneinsatz zu erzielen.

Fall 2 beschreibt einen Zustand, in dem freie (ungenutzte) Ressourcen zu Verfügung stehen. Handlungsstrategien zur Systemoptimierung müssen demnach auf einen Abbau der „Ressourcenverschwendung“ (vgl. Kapitel 2.4.1.2 und 2.3.4) abzielen und eine Reduzierung der im Produktionssystem eingesetzten Ressourcen Personal und Betriebsmittel bewirken. Dies könnte durch Kurzarbeit, den Abbau von Schichten oder Personal, sowie durch Anlagenverkäufe realisiert werden.

Im *Fall 3* hingegen ist zwingend eine Rekonfiguration des Systems erforderlich, um die Veränderungen in der Belastungsstruktur zu beherrschen. Die Nennkapazität reicht langfristig nicht aus, um die errechnete Sollkapazität abzudecken. Ein Kapazitätsaufbau bis spätestens t^* innerhalb des Planungszeitraums ist daher zwingend erforderlich. Als strategische Handlungsoptionen kommen daher einerseits Maßnahmen in Betracht, die auf eine effizientere Leistungserstellung bzw. Ressourcennutzung abzielen. Dies könnte durch Minimierung der Verlustzeiten (Rüstzeiten, technische Leistungsverluste oder Verkettungsverluste) geschehen. Andererseits könnten auch investive Strategien angemessen sein, die den erforderlichen Kapazitätsaufbau bewirken. Hierzu wäre kurzfristig die Einführung von Überstunden oder Zusatzschichten denkbar. Langfristige Engpässe könnten mit zusätzlichen Personaleinstellungen oder Anlageinvestitionen beseitigt werden.

Die Fälle 4 und 5 sind theoretisch auch möglich, sie wurden jedoch durch die Eingangsprämissen ausgeschlossen, da in beiden Fällen die Kundenbedarfe nicht gedeckt werden können. Die Fälle 4 und 5 werden daher in der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

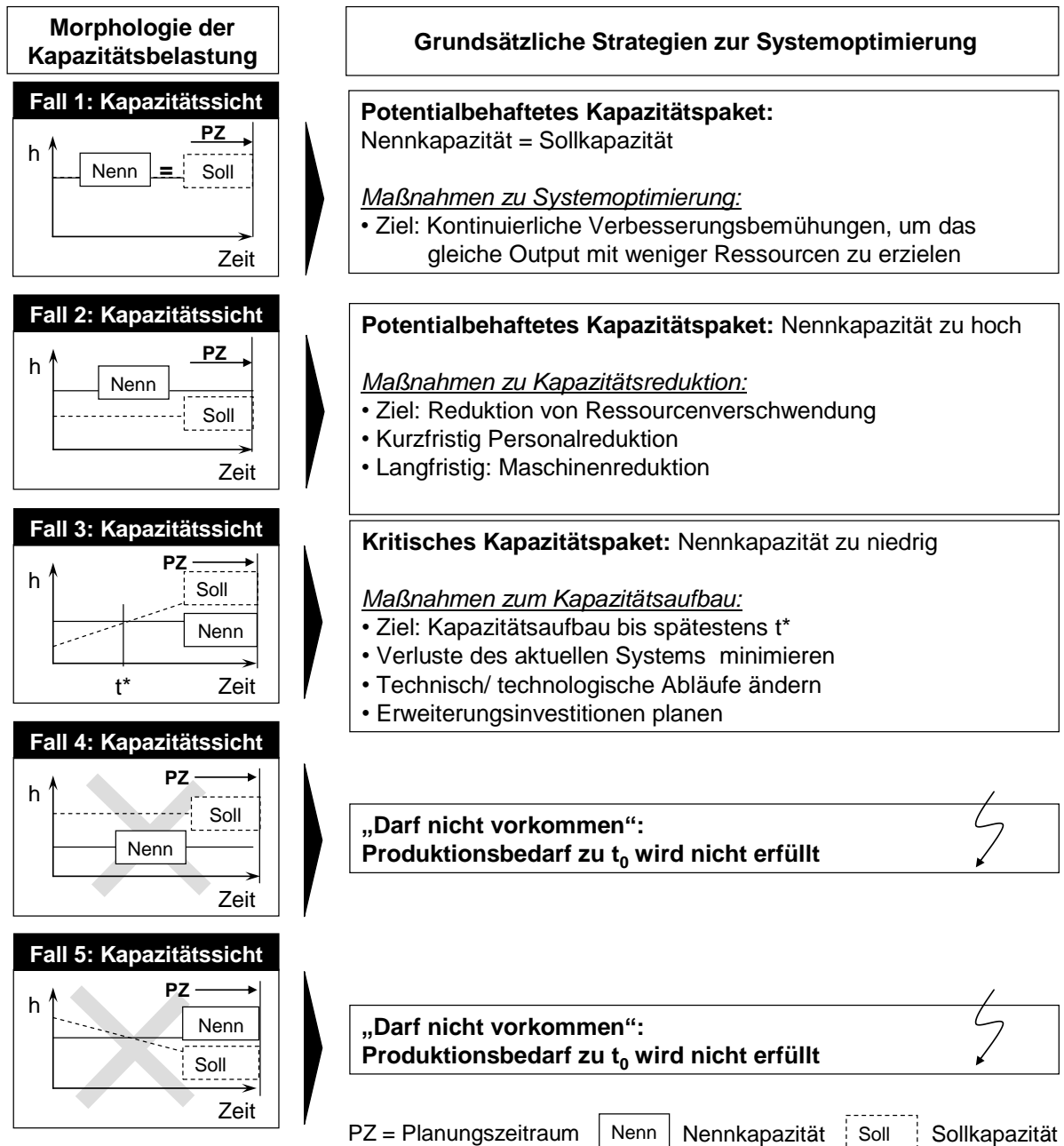


Abb. 4-5: Auswahl kritischer und potentialbehafteter Arbeitspakete

Es stellt sich nun die Frage, welche der jeweiligen Strategien für einen Fall zur konkreten Ausarbeitung weiterverfolgt werden sollten, bzw. welche Strategien den größten Hebel (Potentiale) zur Systemoptimierung besitzen. Die Identifikation derartiger Strategien soll im folgenden Kapitel untersucht werden.

4.2.2 Ableitung von Handlungsstrategien

Um die Anzahl von alternativen Szenarien für die spätere Simulation zu senken, empfiehlt es sich, die zweckdienlichen Strategien einzugrenzen, da ansonsten alle potentiellen Strategien über die Simulation hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Gesamtsystem untersucht werden müssten. Durch die virtuelle Abbildung jeder einzelnen Strategie in der Simulationsumgebung würde dadurch jedoch ein großer Planungsaufwand entstehen. Daher ist ein Verfahren erforderlich, mit dem der Aufwand begrenzt werden kann und geeignete Ansätze mit einem vermeintlich hohen Stückkostensenkungspotential identifiziert werden können. Diese Ansätze lohnen den Aufwand einer Abbildung und Bewertung in der Simulationsumgebung.

Die Ableitung von Ansätzen vollzieht sich dabei in zwei Schritten. Zunächst einmal sind gemäß den Ausführungen von Kapitel 2.2.1.3 und 2.4.1.2 im Rahmen des Lean Managements alle überflüssigen bzw. ungenutzten Ressourcen aus einem System zu entfernen. Diese Maßnahmen führen zu einem Produktionssystem mit einer effizienten, d.h. verschwendungsfreien Ressourcennutzung.

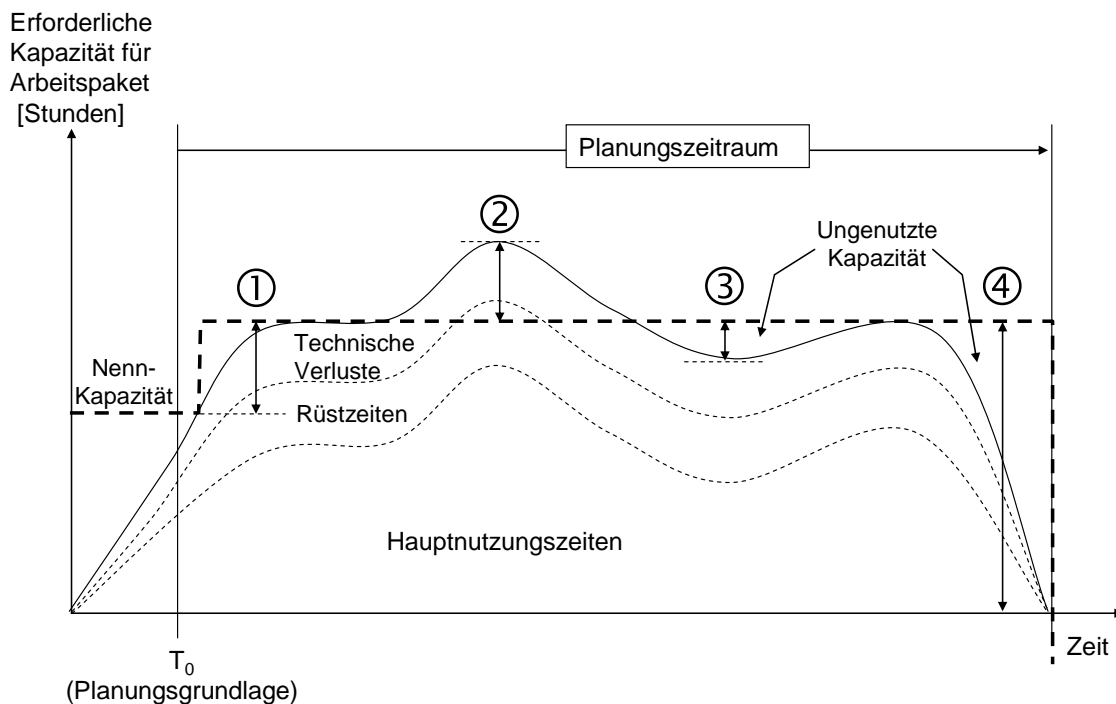
In einem zweiten Schritt kann dann die Kostenoptimierung für das System erfolgen. Dazu muss innerhalb des effizienten Systems über Trade-off Betrachtungen untersucht werden, mit welchen Maßnahmen die entstehenden Kosten der Systemnutzung beeinflusst und optimiert werden können.

Die strategischen Alternativen werden zunächst einmal durch vorgegebene Rahmenbedingungen der Geschäftsleitung eingegrenzt. So könnten z.B. investive Maßnahmen oder Anlagenverkäufe aufgrund von Vorgaben aus der Geschäftsleitung als strategische Optionen zur Systemoptimierung ausgeschlossen sein.

Abb. 4-6 zeigt beispielhaft die erforderlichen Kapazitäten über einen Planungszeitraum und die strategischen Handlungsalternativen für eine dynamische Systemoptimierung. Dabei können die Maßnahmen nach dem Grad ihrer Fristigkeit in kurzfristige und langfristig orientierte strategische Optionen untergliedert werden. Die Art der einzuleitenden Maßnahmen muss jedoch stets in Abhängigkeit der Kapazitätssituation über den gesamten Zeitraum beurteilt werden.

Die ganzheitliche Betrachtung in diesem Beispiel zeigt, dass zu Beginn des Planungszeitraums die Kapazität langfristig erweitert werden muss, um die insgesamt geforderten Mengen produzieren zu können. Über eine Trade-off-Analyse kann das neue, optimale Kapazitäts-

niveau eingestellt werden. Die im weiteren Zeitverlauf auftretenden kurzfristigen Kapazitätsspitzen und Minderauslastungen müssen dann durch geeignete Maßnahmen aufgefangen werden. Die Darstellung der Kapazitäten über Verlustzeiten macht deutlich, welche kurz- bzw. langfristigen strategischen Ansätze zur Realisierung von Potentialen Erfolg versprechen. Über die Life Cycle Betrachtung kann somit der kostenoptimale Mix aus Maßnahmen und langfristig orientierten Kapazitätserweiterungen eingestellt werden.



Strategische Optionen:

- | | |
|---|--|
| <p>① Langfristige Kapazitätserweiterung
Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Schichten • Zusätzliche Maschinenkapazität | <p>② Kurzfristige Kapazitätserweiterung
Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimierung der Rüstzeiten • Minimierung der technischen Verluste |
| <p>③ Kurzfristige Kapazitätsreduktion
Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Personalflexibilisierung | <p>④ Langfristige Kapazitätsreduktion
Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Personal/Schichtabbau • Maschinenreduktion |

Abb. 4-6: Beispiel für strategische Handlungsoptionen über den Planungszeitraum

Die kostentechnische Wirkung der einzelnen Ansatzpunkte lässt sich im Rahmen der Planung mit mathematischen Verfahren abschätzen. Dazu müssen die eingesetzten Ressourcen des Systems als Kostenfunktion abgebildet werden. Über die Zielfunktion minimaler Stückkosten (vgl. Kapitel 1.2) kann dann durch partielle Ableitungen der einzelnen Kostentreiber deren

zeitartbezogener Gradient ausgewiesen werden. Der Gradient gibt die relative Stärke an, mit der dieser Faktor des Systems zu den Gesamtkosten beiträgt.

Das Verfahren ist für die Abbildung statischer Zustände geeignet und kann daher als Hilfe zur Identifikation geeigneter Ansatzpunkte herangezogen werden.

Allgemein betrachtet ergeben sich die Stückkosten SK über einen Planungszeitraum PZ als Funktion der beeinflussenden Faktoren x_i (Zeit und Kostengrößen), so dass gilt:

$$SK = f(\vec{x}) \text{ mit } \vec{x} = [x_1, \dots, x_i].$$

Betrachtet man nun die Beeinflussung der Faktoren auf die Stückkosten, so ergibt sich:

$$\Delta SK(\Delta x_i) = \sum_i \left(\frac{\partial SK(\vec{x}^*)}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right) \quad (4-2)$$

\vec{x}^* beschreibt dabei den aktuellen Arbeitspunkt des Produktionssystems. Bei konstanten Faktorpreisen ist jedoch

$$\frac{\partial SK(\Delta \vec{x})}{\partial x_i} = const., \quad (4-3)$$

so dass die Wahl des Arbeitspunktes keinen Einfluss auf die Betrachtung hat.

Des Weiteren kann die Anzahl der zu fertigenden Teile über eine Periode als Konstante (Stückzahl $n = const.$) angesehen werden, da sie einmalig für den Planungszeitraum als Sollvorgabe festgesetzt wird. Mit den beiden Vereinfachungen ergibt sich aus Formel (4-2):

$$\Delta SK(\Delta x_i) = \frac{1}{n} \sum_i \left(\frac{\partial SK_{PZ}}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right) \quad (4-4)$$

Mathematisch ergibt sich daher die Summe der Kosten über den Planungszeitraum K_{PZ} gemäß Kapitel 2.4.1.1 zu:

$$\begin{aligned} K_{PZ} &= \sum_{PZ} K_P + \sum_{PZ} K_{R,h} + \sum_{PZ} K_{RFGM} \\ &= \sum_{PZ} (K_L \cdot T_P) + \sum_{PZ} K_{R,h} + \sum_{PZ} K_{RFGM} \\ &= \sum_{PZ} (K_L \cdot (T_{Prod} + t_r + T_Q + T_{LV} + \beta \times T_O)) + \sum_{PZ} K_{R,h} + \sum_{PZ} K_{RFGM} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Die Personalkosten K_P werden über die Lohnkosten K_L mit der multiplizierten Personaleinsatzzeit T_P dargestellt. Die Personaleinsatzzeit kann wiederum über die einzelnen Zeitbestandteile in die Produktivzeit T_{Prod} , die Rüstzeit t_r sowie der technischen Verlustzeit T_{TV} , die sich aus den qualitätsbedingten Verlustzeiten T_Q und den Leistungsverlustzeiten T_{LV} zusammen-

setzen, dargestellt werden. Zusätzlich ist noch der Anteil an der organisatorischen Ausfallzeit T_O zu berücksichtigen, der eine Personalanwesenheit erfordert. Dieser soll in der Gleichung durch den prozentualen Faktor β als Wartezeit ausgewiesen werden.

Mit den Gleichungen (4-4) und (4-5) ergibt sich damit die Veränderungen der Stückkosten mathematisch zu:

$$\begin{aligned} \Delta SK = \frac{I}{n} \cdot & \left(\sum_{PZ} (K_L \cdot \Delta T_{Prod}) + \sum_{PZ} (K_L \cdot \Delta t_r) + \sum_{PZ} (K_L \cdot \Delta T_Q) + \sum_{PZ} (K_L \cdot \Delta T_{LV}) \right) + \\ & \left(\sum_{PZ} (K_L \cdot T_O \cdot \Delta \beta) + \sum_{PZ} (K_L \cdot \beta \cdot \Delta T_O) + \sum_{PZ} K_{R,h} + \sum_{PZ} K_{RFGM} \right) \end{aligned} \quad (4-6)$$

Die Kosten für die Betriebsmittel $K_{R,h}$ und die Restfertigungsgemeinkosten K_{RFGM} sind in der Gleichung nicht weiter spezifiziert. Für die Betriebsmittel wird davon ausgegangen, dass diese Kosten nicht in ihren einzelnen Kostenarten, sondern nur auf der Ebene einzelner Einheiten (z.B. Maschinen) veränderbar sind. Als Optionen stehen daher nur die Herausnahme von „ganzen“ Anlagen oder die Hereinnahme zusätzlicher Anlagen zur Verfügung, um die Betriebsmittelkosten zu beeinflussen. Mit der Wahl einer Option entsteht gemäß der Maschinenstundensatzrechnung aus Kapitel 2.4.1.1 ein Kostenblock, der in sich nicht beeinflusst werden kann.

Die Restfertigungsgemeinkosten sind auf der Betrachtungsebene von Kapazitätspaketen nicht relevant, da sie das System im Hinblick auf die Fähigkeit zur Abarbeitung der Fertigungsaufträge nicht beeinflussen. Für die Betrachtung der Kosten auf der Ebene des Produktionssystems sind sie jedoch zu berücksichtigen. Die Restfertigungsgemeinkosten werden jedoch nur zu einem gewissen Anteil innerhalb der Systemgrenzen des Produktionssystems verantwortet. Daher ist die Hebelwirkung von Optimierungsansätzen an dieser Stelle eher gering. Aus diesen Gründen wird auf eine weitere Aufschlüsselung der Kosten in dieser abschätzenden Betrachtung verzichtet.

Über die erstellte allgemeine Kostenfunktion für das Produktionssystem können nunmehr über die Differenzbetrachtungen Trade-off Analysen von verschiedenen Handlungsstrategien über den gesamten Planungszeitraum durchgeführt werden. Wie bereits zuvor dargestellt, sollte der Planungshorizont mehrere Perioden umfassen, damit die nachhaltige Wirtschaftlichkeit der strategischen Ansätze gesichert ist. Ansonsten kann das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsrechnung für Maßnahmen mit einem langfristigen Wirkungshorizont zu Fehlinterpretationen führen, die sich dann in den Folgeperioden z.B. in über- bzw. unterdimensionierten Personal oder

Maschinenkapazitäten niederschlagen. Die langfristige Betrachtung von Maßnahmen über den weiteren Systemlebenslauf bewirkt daher eine Relativierung bzw. Glättung von kurzfristigen Kapazitätsausschlägen.

Analog zu den lebenslaufbezogenen Trade-offs (vgl. Kapitel 2.4.3) kann zudem ermittelt werden, ob die Kostensenkungen etwaige strategiebedingte Kostenerhöhungen an anderer Stelle überkompensieren. Die Rechnung zeigt somit auch auf, welche Investitionskosten für die Durchführung einer strategischen Option gerade noch wirtschaftlich tolerierbar sind („break-even“). Dazu werden die strategischen Stellhebel mit den voraussichtlichen Zeitpotentialen belegt, die durch den strategischen Ansatz erreicht werden sollen. Dieses Verfahren wird für alle relevanten Ansätze durchgeführt. Auf diese Weise kann über die Veränderung der Stellhebel eine kostenorientierte Erfolgsabschätzung der Handlungsstrategien erfolgen.

Die ermittelten vorteilhaften Handlungsstrategien (Stellschrauben) liefern somit die Stellgrößen bzw. die Aufgabenstellung für die Durchführung von entsprechenden Maßnahmen, mit denen die in der Berechnung zugrunde gelegten Potentiale erreicht werden können.

Die Bildung eines Maßnahmenkatalogs zur Beeinflussung der Zeitarten und Ressourcenkosten muss wiederum methodisch unterstützt werden, um die geforderten Einsparungen im System zu erzielen. Gemäß den Ausführungen zu den Ansätzen der sog. „ganzheitlichen Produktionssysteme“ in Kapitel 2.2.1.3 und 2.3.2 müssen zur Erreichung von kontinuierlichen Verbesserungen Methoden für eine lernfähige Produktion im System hinterlegt werden, mit denen die kontinuierlichen Verbesserungen durch Maßnahmen aktiv unterstützt werden können. Die Verbesserungsmaßnahmen müssen hierzu stets eine verbesserte Ressourcennutzung adressieren und demnach die Bereiche Betriebsmittel und/oder Personal optimieren.

Werden die identifizierten Maßnahmen gemäß ihrer potentiellen kostentechnischen Hebelwirkung auf das System absteigend gelistet, ergibt sich somit eine Rangfolge für die weitere Untersuchung. Je nach der unternehmensindividuellen Aufwands-/Nutzenabschätzung wird dann nur noch eine begrenzte Auswahl von Erfolg versprechenden Ansätzen weiterverfolgt. Diese müssen nun gemäß der gebildeten Reihenfolge unter dynamischen Produktionsbedingungen im Rahmen der Systemsimulation verifiziert werden.

4.3 Simulation von alternativen Produktionsszenarien

Die Systemoptimierung soll gemäß der Aufgabenstellung in Kapitel 1.2 mit simulationsbasierten Werkzeugen erfolgen. Dazu kann nun eine Ablaufsimulation mit den vorkalkulierten Systembelastungen (Kapazitätspaketen) erfolgen. Die Vorteile der Simulation sowie die dazu erforderlichen Daten wurden bereits in den Kapiteln 2.3.1, 2.4.1.2 und 2.4.4 dargestellt.

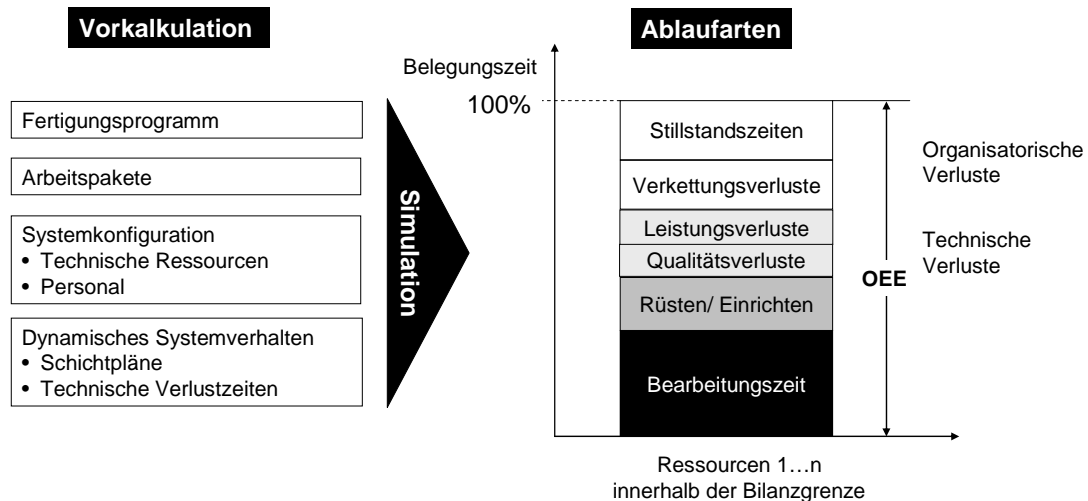


Abb. 4-7: Ergebnisse der Simulation

Um das Systemverhalten über den Life Cycle abbilden zu können, müssen die zu fertigenden Aufträge, deren zeitliche Reihenfolge, die Schichtpläne und technischen Verlustzeiten über den Planungszeitraum für das Kapazitätspaket im Referenzmodell hinterlegt werden (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2). Des Weiteren müssen die zeitlichen Änderungen, die sich durch die strategischen Handlungsansätze ergeben, in der virtuellen Planungsumgebung umgesetzt werden, um die Auswirkungen der neuen Systemkonfiguration vor deren tatsächlicher Realisierung zu überprüfen. In Abb. 4-7 sind die Eingangsgrößen für die Simulationsumgebung sowie die Ergebnisse aus dem Simulationslauf dargestellt. Als Ergebnis entsteht durch die Simulation eine ressourcenorientierte Darstellung der Ablaufarten unter dynamischen Systembedingungen. Diese ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Auslastungsgrade und Störeinflüsse, die auf das System und die eingesetzten Ressourcen jeweils unterschiedlich einwirken. Über die Simulation kann so das dynamische Verhalten des Produktionssystems mit der geänderten Systemkonfiguration abgebildet werden.

Die Ergebnisse der Ablaufsimulation müssen nun in Bezug auf das mit der jeweiligen Systemkonfiguration erzielte Stückkostenniveau bewertet werden (vgl. hierzu auch Kapitel 2.4.1.2).

4.4 Bewertung geeigneter Handlungsstrategien

Über die Simulation werden Prognosen über die erforderlichen Ablaufarten der Systemressourcen erstellt. Dadurch kann festgestellt werden, ob das betrachtete Kapazitätspaket mit der geänderten Systemkonfiguration grundsätzlich abgearbeitet werden kann. Mit der Ablaufsimulation kann daher eine Systemvalidierung hinsichtlich der Erfüllung der Sollkapazität erfolgen. Des Weiteren werden Kapazitätsreserven sowie ggf. weitere Rationalisierungspotentiale ausgewiesen. Die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen der angesetzten Änderungen muss in einem weiteren Schritt erfolgen.

Dazu müssen die Systemänderungen in kostentechnische Größen überführt werden, um die entsprechenden Stückkosten zu ermitteln. Sofern investive Ansätze verfolgt wurden, muss vor der Einleitung von konkreten Maßnahmen die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen werden. Daher werden in diesem Schritt die verschiedenen strategischen Varianten hinsichtlich ihrer Eignung zur Senkung der Stückkosten untersucht.

Die Ergebnisse der Kostenwirkung verschiedener alternativer Szenarien dienen dann als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Migrationsstrategien. Zur kurz- bzw. langfristigen Beurteilung der Fertigungskosten werden dazu die verschiedenen Verfahren der Kostenrechnung gemäß Kapitel 2.4 und insbesondere 2.4.5 eingesetzt. Die Bewertung vollzieht sich dabei in zwei Schritten, die im Folgenden dargestellt werden.

1. Schritt: Kurzfristiger Vergleich der Fertigungskosten

Im ersten Schritt werden die Kosten der neuen Systemkonfiguration über den Planungszeitraum ermittelt und der aktuellen Konfiguration gegenübergestellt. Dazu müssen die neuen Ressourcenkosten (Personal, Betriebsmittel) erfasst und summarisch der bestehenden Konfiguration gegenübergestellt werden.

Für den Fall, dass investive Strategien verfolgt werden, werden die neuen Anlagen mithilfe kalkulatorischer Maschinenstundensätze berechnet. Die Kalkulation des Stundensatzes erfolgt über eine angenommene Einsatz- bzw. Lebensdauer des Betriebsmittels.

Die zu fertigenden Stückzahlen sind stets durch die Kundenaufträge gegeben und werden deshalb als einheitliche Bezugsgröße zur Kalkulation der Stückkosten verwandt. Für den Vergleich verschiedener strategischer Alternativen untereinander sind sie damit keine entscheidungsrelevante Größe. Somit zeichnet sich der vorteilhafteste Ansatz durch die geringsten absoluten Systemkosten aus. Mit den mathematischen Grundlagen aus Kapitel 2.4.1.1 ergeben sich die Systemkosten mathematisch als Summe über alle Betriebsmittelkosten $K_{R,h}$, Personalkosten K_L und Restfertigungsgemeinkosten K_{RFGM} zu:

$$K_{Sys,h} = \sum_i K_{RH} + \sum_j K_L + \sum K_{RFGM} \quad (4-7)$$

Diesem Vergleich unterliegen auch investive Ansätze, mit denen eine Erhöhung der Outputleistung erzeugt werden soll. Auch in diesem Fall gilt die (neue) Stückzahl als einheitliche Maßgröße für die verschiedenen strategischen Optionen. Die Schaffung von etwaigen temporären Kapazitätsreserven bedeutet somit in Analogie zu den Gesetzmäßigkeiten der Systemtechnik komparative Kostennachteile gegenüber anderen Optionen.

2. Schritt: Langfristige Wirtschaftlichkeitsrechnung

Wie zuvor dargestellt, unterliegt die kurzfristige Betrachtung der Kosten bestimmten Annahmen, die sich aus kalkulatorischen Verteilungsschlüsseln ergeben (z.B. lebenslauforientierte Nutzungsstunden einer neuen Anlage). Um diese Unsicherheit aufzufangen, kann über die Kostenvergleichsrechnung bzw. Amortisationsrechnung die langfristige Wirtschaftlichkeit des Projektes untersucht werden. (vgl. Kapitel 2.4.2.1)

Im zweiten Schritt wird daher nicht der Planungszeitraum für das Kapazitätspaket, sondern die Projektlaufzeit des strategischen Ansatzes bzw. der Investitionen zugrunde gelegt. Dazu wird der erforderliche Kapitalbedarf für die Durchführung des Maßnahmenpaketes ermittelt und über den Zeitverlauf dargestellt.

Durch die Anwendung einer erweiterten periodenübergreifenden Kostenvergleichsrechnung kann festgestellt werden, welche zusätzlichen Finanzmittel in der Zukunft für diese Maßnahme im Vergleich zur vorhandenen Systemkonfiguration aufgewendet werden müssen.

Über eine derart ausgestaltete Amortisations- bzw. Stückkostenvergleichsrechnung kann so der Risikograd eines strategischen Ansatzes untersucht und beurteilt werden. Das Durchlaufen der „Nulllinie“ zeigt den „break-even“ Punkt. Zu diesem Zeitpunkt wird das zuvor eingesetzte Kapital genau durch die erzielten Einsparungen wieder aufgewogen (Amortisationszeitraum).

In der Praxis werden heute zumeist Amortisationszeiträume von weniger als 2 Jahren für Investitionen erwartet. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 4-8 qualitativ dargestellt.

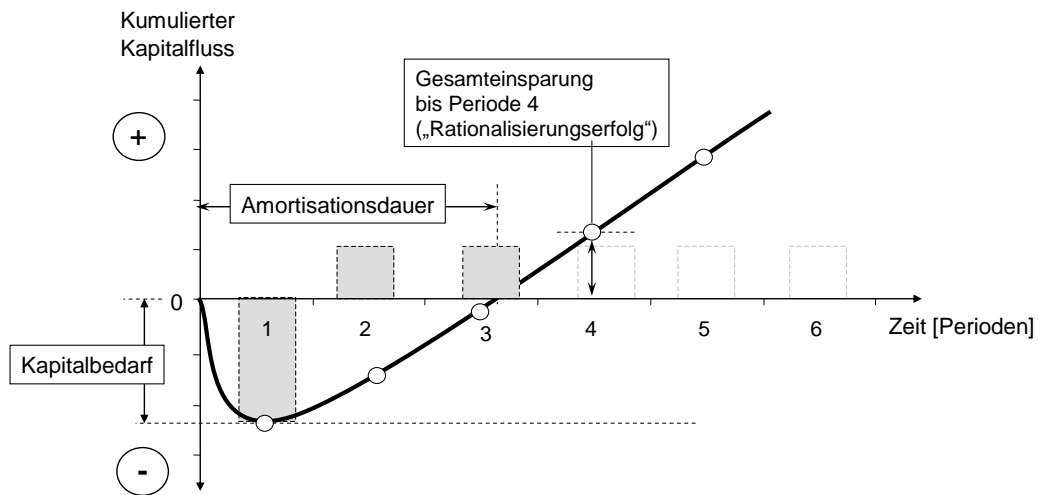


Abb. 4-8: Evaluation von Migrationsalternativen

Weiterhin kann durch diese Untersuchung die erzielte Gesamteinsparung über die Planungsperioden abgelesen werden. Dieser Wert stellt somit den Rationalisierungserfolg durch die beabsichtigte Systemrekonfiguration dar.

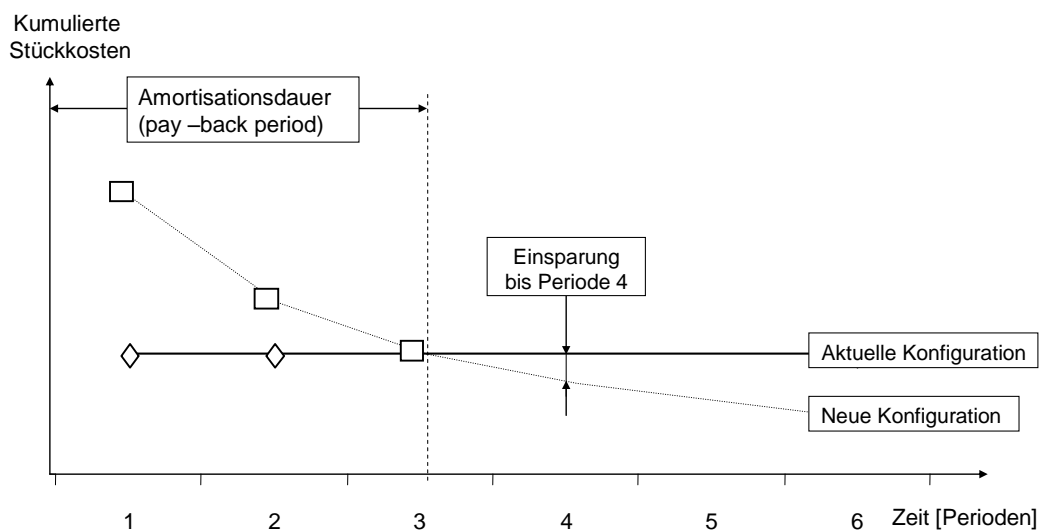


Abb. 4-9: Entwicklung der kumulierten Stückkosten

Die Entwicklung der kumulierten Stückkosten je Periode ergibt sich als die Summe der bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Kosten dividiert durch die bis dahin gefertigte kumulierte Produktionsmenge.

Abb. 4-9 zeigt beispielhaft diese Entwicklung der kumulierten Stückkosten über die Zeit. Da in der Serienproduktion zumeist ein Produktmix aus verschiedenen Varianten gefertigt wird, können die Stückkosten auch auf ein geeignetes Referenzteil oder Referenzteil(e)spektrum bezogen werden. Dies dient dann als repräsentative Einheit zur Abbildung und zum Vergleich der Systemverbesserungen.

4.5 Auswahl und Umsetzung konkreter Maßnahmen

Die Bewertung der strategischen Handlungsalternativen muss demnach, wie zuvor dargestellt, über eine Bewertung der Stückkostenwirkung sowie über eine Investitionsrechnung zur Absicherung des Investitionsvorhabens erfolgen. Nachdem dieser Schritt für alle ausgewählten Ansätze durchgeführt wurde, muss nun die beste Handlungsoption ausgewählt und innerhalb des Systems umgesetzt werden. Die Auswahl der besten Strategie erfolgt nach folgenden Kriterien:

Potential zur Senkung der Stückkosten

Die verschiedenen Optionen werden hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Senkung der Stückkosten in absteigender Rangfolge sortiert.

Kapitalbedarf und Amortisationszeitraum

Die unter Punkt 1 gebildete Rangfolge muss jedoch auch den innerbetrieblichen Kriterien bezüglich der Wirtschaftlichkeit genügen. Daher sind nur diejenigen Alternativen weiter zu berücksichtigen, deren Kapitalbedarf und Amortisationszeit innerhalb der durch die Unternehmensleitung festgelegten Rahmenbedingungen liegt.

Die über den Einsatz verschiedener Verfahren identifizierten Maßnahmen zur Verbesserung der Ablaufarten und Systemkosten müssen nun im Produktionssystem implementiert werden. Dazu wird die verbesserte Systemkonfiguration umgesetzt und in den Plänen für den Einsatz der Ressourcen sowie den Dokumenten zur Fertigung der Aufträge (insbesondere Arbeitspläne) festgeschrieben. Gemäß den Ausführungen von Kapitel 2.3.3 kann nur so die dauerhafte Realisierung der Verbesserungspotentiale umgesetzt und sichergestellt werden.

4.6 Betriebsdaten zur Systemüberwachung

Durch die Vorkalkulation werden Soll-Zeiten für die Bearbeitung der Aufträge generiert. Diese Daten müssen in der Nachkalkulation mit den realen Produktionsdaten permanent überwacht und verglichen werden. Die hierzu erforderlichen Daten, Erfassungssysteme und Entstehungsorte wurden bereits in Kapitel 3 definiert.

Durch die hierarchische Systemstruktur können mit den Produktionsdaten auch Teilsysteme bis hin zu einzelnen Maschinen analysiert und mit Planwerten aus der Arbeitsvorbereitung verglichen werden (vgl. Kapitel 2.2.1.2 und 2.3.4). Dadurch werden Ansatzpunkte für Verbesserungspotentiale auf jeder Ebene des Produktionssystems aufgedeckt. Die neuen Werte bilden dann die Grundlage für zukünftige Planungszyklen.

Abweichungen von den Planwerten liefern einerseits Hinweise für Unschärfen und Korrekturbedarfe in der Modellierung, sie stellen aber auch Potentiale im Produktionssystem dar, die noch durch gezielte Verbesserungsmaßnahmen ausgeschöpft werden können.

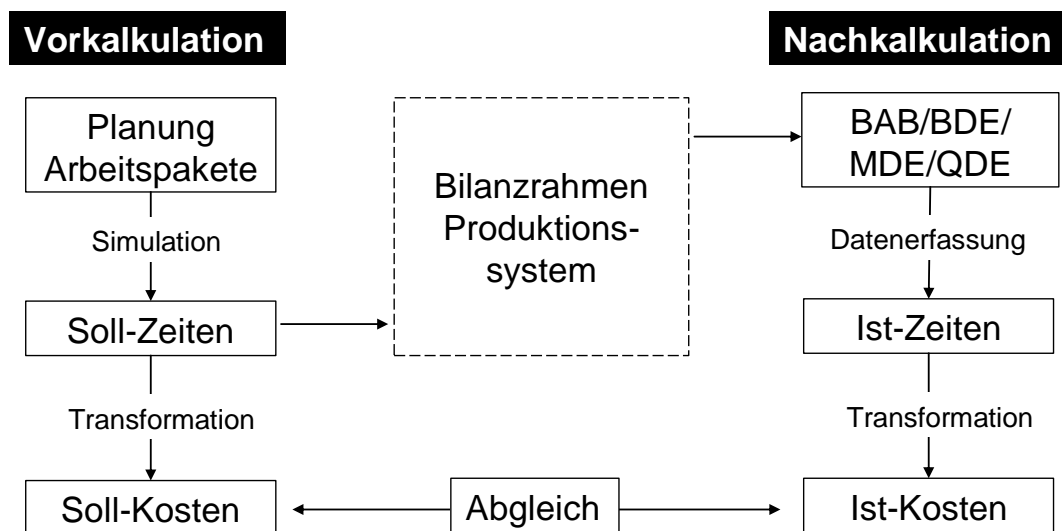


Abb. 4-10: Nachkalkulation und Prognosekorrektur

In Abb. 4-10 ist der permanente Abgleich zur Nachkalkulation und Prognosekorrektur der Zeit- und Kostendaten dargestellt. Das Reglungsmodell stellt somit Ereignis-, Planungs- und Bewertungsdaten über den Zeitverlauf bereit. Auf diese Weise kann ein Regelkreis geschaffen werden, der permanent aktualisierte Referenzen für die durchzuführenden Planungszyklen bereitstellt. Die erzielten Systemverbesserungen müssen jedoch auch Eingang in die Arbeitspläne finden, um die Potentiale in zukünftigen Planungszyklen zu realisieren. (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.3) Die fortlaufende Planung, Optimierung und Kontrolle des Produktions-

geschehens versetzt den Anwender in die Lage, die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems permanent über den Lebenslauf zu überwachen.

Damit befähigt die Methodik den Nutzer, die innere Aufbau- und Ablauforganisation des Produktionssystems direkt zu adressieren und zu verändern. Durch geeignete und validierte Rationalisierungsmaßnahmen kann das Produktionssystem selbst zielgerichtet verändert werden. Dies geschieht über externe und interne Veränderungstreiber, die auf das System einwirken. Einwirkungen auf das System sind demnach durch die Märkte induziert oder aber gezielt durch kontinuierliche Rationalisierungsanstrengungen in das System eingebracht. Im folgenden Kapitel wird die Methodik zusammengeführt und in einen geschlossenen Regelkreis überführt.

4.7 Dynamischer Regelkreis des Life Cycle Controlling

Aufgrund der identifizierten Anforderungen an das Life Cycle Controlling muss die Methodik einen möglichst langfristigen Planungshorizont umfassen, um den Nutzen von Verbesserungsmaßnahmen nachhaltig abzusichern. Je nach Grad der Planungssicherheit und der Volatilität des Fertigungsprogramms kann der Planungshorizont somit auch direkt bis zur geplanten Systemstilllegung gewählt werden.

Im Rahmen der kontinuierlichen Systemoptimierung werden die zu erwartenden Kosten für potenzielle Maßnahmen prognostiziert. Dazu sind entsprechend dem Paradigma einer lebenslauforientierten Kalkulation die Kostenwirkungen über den weiteren Systemlebensweg darzustellen. In dem Planungsansatz müssen daher die Auswirkungen von Maßnahmen in ihrer kurz-, mittel- und langfristigen Wirkung beschrieben und ausgewertet werden. Dabei verschiebt sich der Planungshorizont (Zeitraum) mit fortschreitenden Planungszyklen kontinuierlich über die Zeitachse in Richtung der geplanten Außerdienststellung des Systems. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 4-11 dargestellt.

Die Wirtschaftlichkeit der eingeleiteten Optimierungsmaßnahmen muss über den Zeitverlauf kontinuierlich überprüft und nachgehalten werden, denn durch die externen und internen Veränderungstreiber unterliegt das System einer ständigen Dynamik. Der optimale Betriebspunkt des Systems muss dementsprechend ständig überwacht und nachgeführt werden. Dazu muss die Methodik in ein Regelmodell überführt werden, mit dem die stückkostenoptimale Systemkonfiguration in Abhängigkeit der zu fertigenden Aufträge kontinuierlich eingestellt werden

kann. Damit findet für den Planungszeitraum eine Synchronisation des Produktlebenszyklus mit dem bestehenden Produktionssystem statt, da sich die Systemanpassungen stets an der Entwicklung der Kapazitätspakete orientieren.

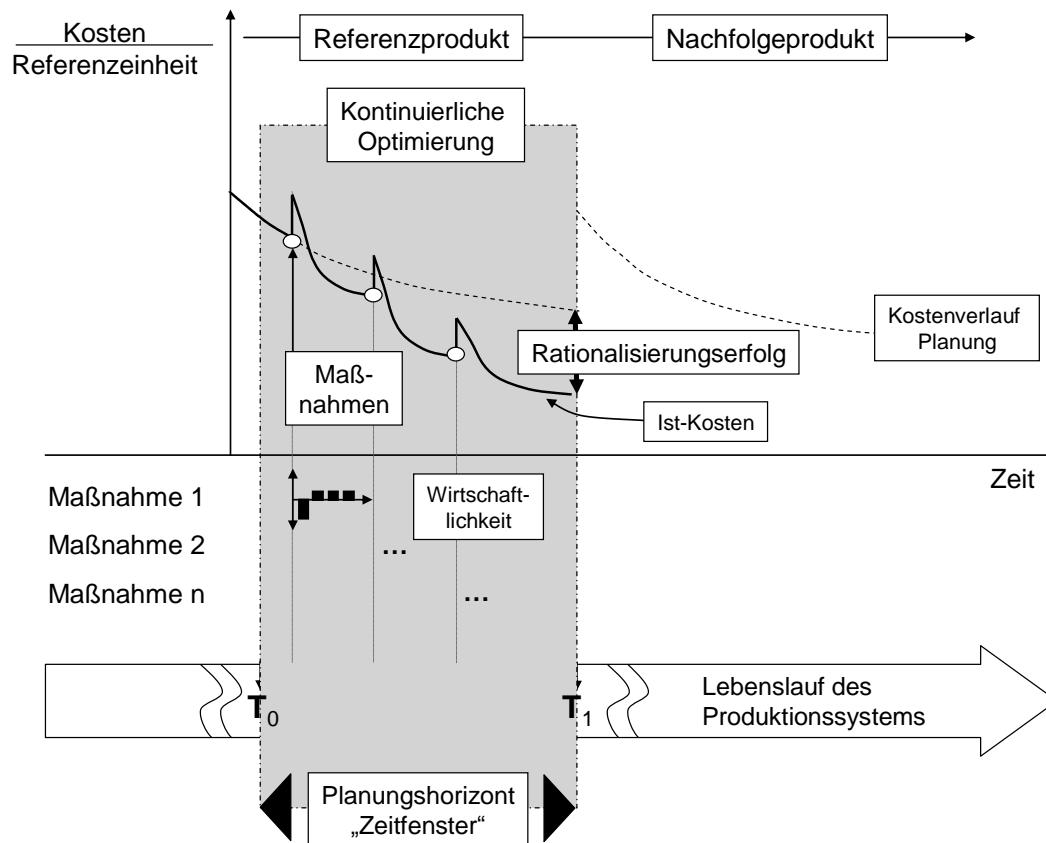


Abb. 4-11: Synchronisation des Produktlebenszyklus mit dem Systemlebenslauf

Der Regler besteht dazu aus einer Planungs- und Optimierungsumgebung, in der die Regelstrecke Produktionssystem abgebildet und in ihren Ablaufprozessen simuliert werden kann. Der hierzu entwickelte Regelkreis ist dazu zusammenfassend in Abb. 4-12 dargestellt.

Im Regler werden zunächst aus den Fertigungsaufträgen Kapazitätspakete für das Produktionssystem generiert (vgl. Punkt 1 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2). Die Pakete stellen die erforderliche aufsummierte Kapazität eines bestimmten gleichen Maschinentyps dar. Über die Arbeitspläne und die aktuelle Systemkonfiguration können so über die Summation der erforderlichen Hauptnutzungs-, Rüst- und technischen Verlustzeiten die benötigten Soll-Kapazitäten ermittelt werden. Diese müssen mit der verfügbaren Nenn-Kapazität des Kapazitätspaketes verglichen werden. Die aktuelle Nenn-Kapazität liegt im Referenzmodell bereits vor bzw. wird über die betriebliche Datenverwaltung kontinuierlich eingespielt und erfasst (vgl. Punkt 2 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2).

Im Rahmen der Optimierung können nun alternative Fertigungsszenarien bzw. potentielle Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer lebenslaufbezogenen Wirkung (Trade-offs) und in ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden (vgl. Punkt 3 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2).

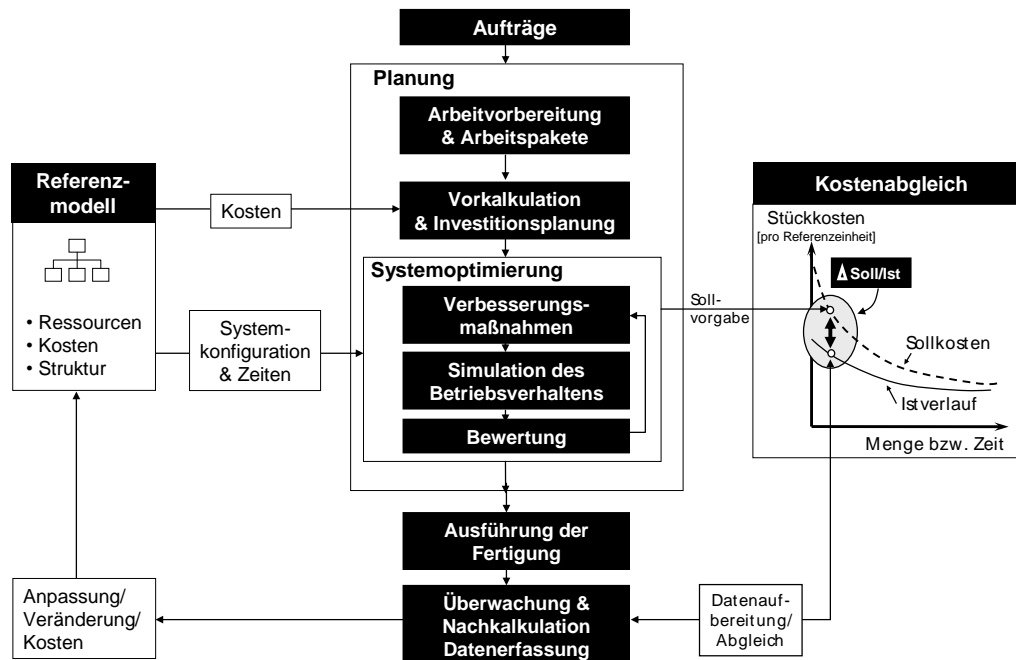


Abb. 4-12: Regelkreis zum Life Cycle Controlling

Durch die Entwicklung alternativer Szenarien für das Produktionssystem werden in diesem Bereich ggf. mehrere Optimierungsschleifen durchlaufen. Für die Analyse werden diese strategischen Optionen zunächst im Referenzmodell abgebildet und simulationsbasiert ausgewertet. Das Ergebnis der Simulation ist die zeitliche Darstellung der einzelnen Ablaufarten auf der Basis der aktuellen Systemkonfiguration (vgl. Punkt 4 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2).

Die ermittelten Zeiten und Stückzahlen bilden die Grundlage für die kostentechnische Bewertung der Systemleistung im untersuchten Planungshorizont (vgl. Punkt 5 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2).

Für den ausgewählten Ansatz werden dann konkrete operative Maßnahmen entwickelt, mit denen die geplanten Zeitersparnisse im System erreicht werden können. Die Maßnahmen werden bezüglich der aufzuwendenden Finanzmittel und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit überprüft (vgl. Punkt 6 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2) und gemäß den Kriterien der Unternehmensleitung im Produktionssystem umgesetzt. Die Produktion erfolgt unter ständiger Erfassung der Betriebsdaten, die in der Nachkalkulation ausgewertet werden. Im Rahmen des

Controllings werden die prognostizierten Zeiten und Kosten mit der realen Systemleistung abgeglichen, um die Zielerreichung zu überwachen.

Der Regelkreis wird geschlossen, indem die tatsächlichen Ist-Daten der Nachkalkulation wieder in die Arbeitsvorbereitung zurückgespielt werden und als Planungsgrundlage für die künftige Vorkalkulation dienen. Durch die unmittelbare Rückkopplung der Systemplanung mit einer betriebsdatengestützten Zeit- und Kostenauswertung entsteht somit ein geschlossenes Controllingssystem für einen simulationsbasierten Regelkreis, mit dem Produktionssysteme kontinuierlich über den Lebenslauf geplant, betrieben und optimiert werden können. (vgl. Punkt 7 der Zielsetzung aus Kapitel 1.2)

Damit ist die Entwicklung eines geschlossenen Reglermodells zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen abgeschlossen. In einem letzten Schritt soll nun die entwickelte Methodik hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Praxistauglichkeit an einem realen Produktionssystem in der industriellen Serienfertigung verifiziert werden.

5 Verifikation der Methodik am Fallbeispiel

Die entwickelte Planungsmethodik wurde im Rahmen eines industriellen Fallbeispiels bei einem mittelständischen Hersteller von Elektrowerkzeugen auf ihre Anwendbarkeit in der Produktion überprüft. Durch die volatilen Marktbedingungen unterliegt die Teilefertigung häufigen Planungszyklen mit veränderlichen Rahmenbedingungen. Aufgrund der Wettbewerbssituation besteht zudem ein stetiger Rationalisierungsdruck zur Optimierung der Fertigungsprozesse und -systeme. Dazu wurde die entwickelte Controllingmethodik für die Regelung eines abgegrenzten Produktionssystems der Serienfertigung eingesetzt. Im Folgenden soll die Vorgehensweise bei der Systemregelung mit der entwickelten Methodik dargestellt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit überprüft werden. Aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung sind allerdings einige Daten und Kennzahlen in normierter Form dargestellt.

5.1 Darstellung des Unternehmens

Das Unternehmen fertigt mit ca. 230 Mitarbeitern Elektrowerkzeuge für die Metall- und Holzbearbeitung. Der Umsatz lag 2005 bei ca. 50 Mio. €.

Das Jahresvolumen der Klein- und Großserien, die das Produktionssystem durchlaufen, umfasst bis zu 16.000 Einheiten pro Jahr. Die Endprodukte setzen sich in weiten Teilen aus standardisierten Modulbaukästen zusammen und bestehen zumeist aus standardisierten Programmlinien für den Großhandel. In geringen Mengen werden jedoch auch kundenspezifische Lösungen entwickelt und in Sonderlinien gefertigt.

Die Wertschöpfungskette reicht dabei von der Produktkonstruktion über die Fertigung und Montage der Antriebsmotoren und Gehäuse bis hin zur Endmontage. Die Fertigung erfolgt weitgehend auftragsbezogen, wobei die innerbetriebliche Logistik der „Rennerlinien“ über Kanbansysteme realisiert wird. Einige Teilmodule werden auch in Auftragsfertigung direkt an Wettbewerber verkauft.

5.2 Kennzahlen des Produktionssystems

Die entwickelte Methodik wurde exemplarisch für den Bereich der spanenden Fertigung verifiziert. Dieser Bereich stellt eine abgegrenzte Produktionseinheit mit den Ressourcen Personal, Betriebs- und Hilfsmittel dar. Durch die Anzahl der Maschinen und des Personals verantwortet dieser Bereich einen großen Anteil der Fertigungskosten.

In dem betrachteten System werden pro Jahr in der Summe ca. 121.000 Teile produziert. Dies geschieht über Aufträge mit einer durchschnittlichen Losgröße von ca. 300 Teilen. Die durchschnittliche Bearbeitungszeit der Teile variiert zwischen 0,8 und 30min. Im Mittel errechnet sich die durchschnittliche Bearbeitungszeit mit 5,5min.

Das Mann-Bedienverhältnis liegt durchschnittlich bei 1:2. Die Aufgaben der Werker umfassen das Rüsten der Maschine, die Materialbereitstellung, den Teilewechsel und statistische Messungen kritischer Maße an den gefertigten Werkstücken zur Überwachung der Prozessfähigkeit.

Am Werkzeugeinstellplatz werden die zur Teilebearbeitung erforderlichen Werkzeugsätze durch den Werkzeugeinsteller vermessen und zusammengestellt. Dieser ist zudem für die Bereitstellung der Werkzeugsätze, Spannvorrichtungen und der erforderlichen Messmittel für die laufende Werkstückkontrolle am Arbeitsplatz zuständig.

Die Erstteilvermessung nach dem Einfahren und Überprüfen der Spannvorrichtungen wird von der Qualitätssicherung durchgeführt. Für den Fall, dass die Maßhaltigkeit nachgewiesen werden kann, erfolgt die Freigabe zur Produktion.

Die teilweise sehr kurzen Bearbeitungszeiten erfordern eine hohe Werkstückwechselfrequenz. Zur Verringerung bzw. Vermeidung von zu hohen Stillstandszeiten an den Maschinen sind diese zumeist mit Drehtischen zum Palettenwechsel ausgestattet. Des Weiteren sind für die häufig gefertigten Teile, sofern dies durch die geometrischen Abmessungen möglich ist, Vorrichtungen zum parallelen Einspannen von zwei bzw. vier Werkstücken entwickelt worden.

Die Entlohnung der Werker erfolgt über ein Prämienlohnsystem. Dabei wird aus den Vorgabezeiten für die Auftragsbearbeitung eine Sollzeit ermittelt. In der Nachkalkulation wird dann für die Entlohnung der erreichte Zeitgrad durch die Verrechnung der Schichtzeit abzüglich der auftragsabhängigen Rüstzeiten und Störungszeiten mit der Planzeit für die Fertigung errechnet. Um eine Reduktion der Rüstzeiten zu erreichen, wurden einige Spannvorrichtungen mit

automatisierten (pneumatischen) Schließmechanismen ausgestattet. Weiterhin wurde der Einbau der Vorrichtungen auf dem Maschinentisch zunehmend auf Schnellverschlüsse und standardisierte Rasterplatten umgestellt.

Die Instandhaltung der Maschinen erfolgt an Wochenenden bzw. an zwei Tagen im Jahr, an denen das gesamte Produktionssystem stillgelegt wird. Regelmäßige Wartungszeiten mit einer Zeitdauer von weniger als 15min. werden nicht erfasst. Reinigungsarbeiten werden von externen Dienstleistern während der unbelegten Zeiten durchgeführt.

5.3 Simulationsbasierte Planung in der Produktion

Für die Simulation der Fertigungsabläufe innerhalb des Produktionssystems wurde die Simulationssoftware WITNESS der LannerGroup eingesetzt, da das Unternehmen plant, diese in der Zukunft für die Optimierung der internen Produktionsabläufe zu verwenden.

Mit WITNESS lassen sich produktionstechnische Vorgänge im Rahmen einer Ablaufsimulation darstellen. Die Software bietet ein Werkzeug, mit dem sich Zeitanalysen von Objekten im Rahmen von diskreten, ereignisorientierten Simulationsschleifen durchführen lassen. Die Software zeichnet sich durch Objektbibliotheken und zahlreiche statistische Funktionen zur Abbildung von stochastischen Störgrößen aus. Sie entspricht damit den Anforderungen an Systeme zur Ablaufsimulation, die bereits in Kapitel 2.4.4 dargestellt wurden.

Als Ergebnis der Simulationsläufe werden die Ablaufarten (Zeiten) der programmierten Entitäten ausgewiesen, die dann in einem weiteren Schritt in Kostengrößen transformiert werden. WITNESS verfügt über Schnittstellen zu verschiedenen Systemen der Produktionsplanung und Betriebsdatenerfassung sowie zu Microsoft Office Anwendungen. Daher wurde das allgemeine Referenzmodell für Produktionssysteme aus Kapitel 3 in der Visualisierungssoftware VISIO in eine ressourcenorientierte Darstellung der Entitäten übertragen. Diese gehen zusammen mit der verrichtungsorientierten Darstellung der Prozesse über die Arbeitspläne und Bedarfe in die Simulationsumgebung ein. Über die Transformation der Informationen in WITNESS erfolgt dann die Simulation der Prozessabläufe. In Abb. 5-1 sind die zur Initialisierung der Simulationsumgebung erforderlichen Systemsichten noch einmal dargestellt.

Im Moment muss diese Transformation noch manuell geleistet werden, da bislang noch kein Interface existiert, das eine direkte Transformation der UML-Klassendiagramme in eine Simulationsumgebung erlaubt.

Es ist jedoch zu erwarten, dass dies in der Zukunft durch die Weiterentwicklung von existierenden Interfaces (z.B. WITNESS VISIO Simulation Solution) möglich sein wird. Damit stünde dann eine durchgängige Softwareumgebung zur Verfügung, mit der UML-basierte Modelle von Produktionssystemen aus der Office-Umgebung direkt in ein Simulationssystem überführt werden können.

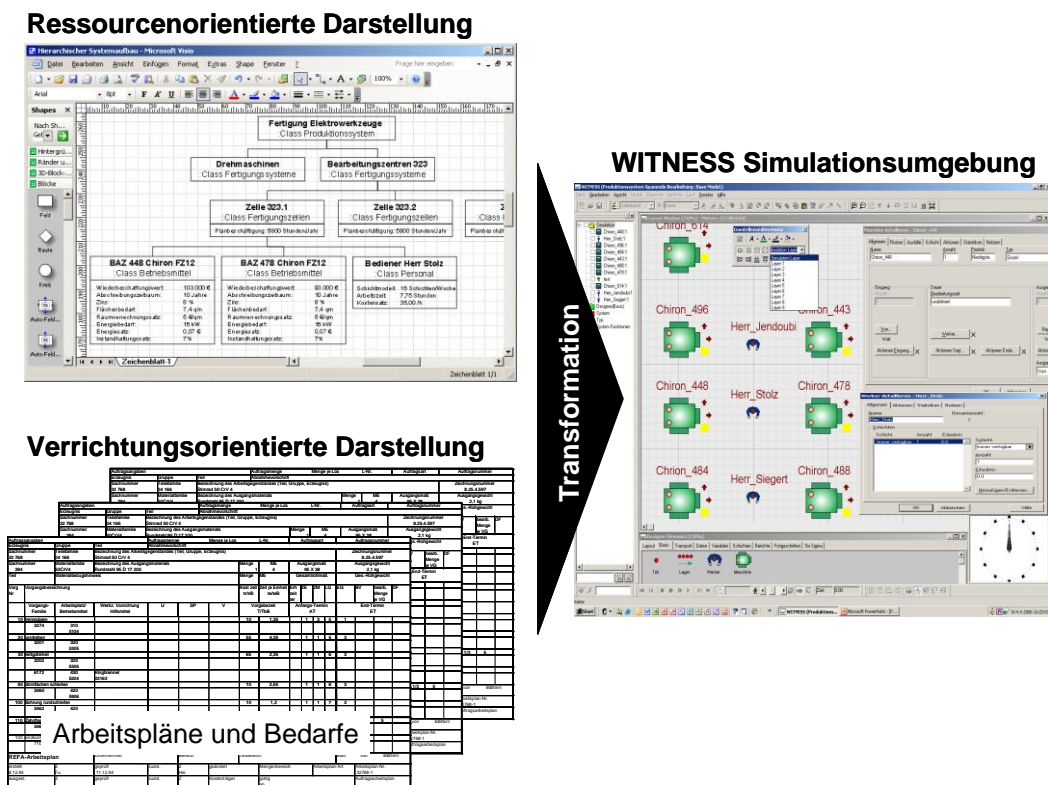


Abb. 5-1: Transformation des Produktionssystems in die Simulationsumgebung

5.4 Aufbau und Struktur des Produktionssystems

Im Produktionssystem werden Gussteile (z.B. Lagergehäuse) spanend bearbeitet, die dann in die Montage der Endprodukte (z.B. Winkelschleifer) eingehen. Die Halbzeuge werden aus Sandguss, Kokillenguss oder Druckguss von externen Zulieferern in das Zentrallager angeliefert und über das betriebsinterne Kanbansystem bereitgestellt. In dem betrachteten Produktionssystem erfolgt eine einstufige spanende Bearbeitung der Teile. Nach der Bearbeitung verlassen die Teile das betrachtete System und werden im benachbarten Bereich gewaschen. Das Produktionssystem umfasst 7 Bearbeitungszentren und eine Personalkapazität von durchschnittlich 5,7 Mitarbeitern.

Abb. 5-2 zeigt die Grundstruktur des betrachteten Produktionssystems im Unternehmen. Die Bereiche des Werkzeugeinstellplatzes sowie das Vorrichts- und Werkzeuglager, die Qualitätssicherung und die Arbeitsvorbereitung stehen als übergeordnete Bereiche für die gesamte Produktion zur Verfügung. Sie werden jedoch über einen Restfertigungsgemeinkostensatz erfasst und entsprechend verrechnet.

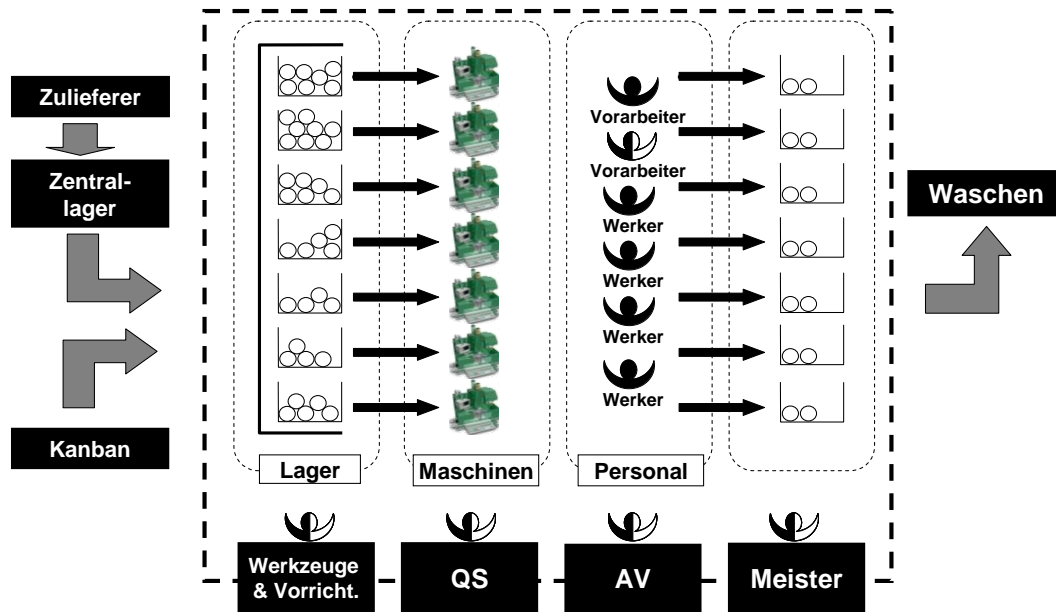


Abb. 5-2: Struktureller Aufbau des Produktionssystems

Das Produktionssystem umfasst einen Lagerplatz für Kanbanteile, aus dem die Versorgung der einzelnen Arbeitsplätze erfolgt. Das System besteht zwar aus einzelnen unabhängigen Maschinen, die durch eine einfache Input/Outputbeziehung beschrieben werden können. Durch die Mehrmaschinenbedienung der Werker entsteht jedoch eine komplexe Systemstruktur mit gegenseitigen Abhängigkeiten der eingesetzten Fertigungsressourcen. Für die Systemoptimierung bietet sich daher die Ablaufsimulation als Werkzeug an, um in virtuellen Szenarien die Wirksamkeit von strategischen Handlungsoptionen hinsichtlich ihrer Eignung in Bezug auf eine kostenoptimale Systemadaption vorab zu untersuchen.

5.5 Anwendung der Methodik auf das Produktionssystem

Die folgenden Kapitel beschreiben die Anwendung der entwickelten Methodik für die Optimierung des betrachteten Produktionssystems. Dazu muss zunächst das Produktionssystem in einem Modell abgebildet und initialisiert werden, bevor der Regler zur Systemoptimierung

eingesetzt werden kann. Um die Funktion des dynamischen Regelungsmodells zu verifizieren, werden die hierzu erforderlichen Schritte analog zu dem entwickelten methodischen Vorgehen aus Kapitel 4 durchgeführt und im Folgenden dargestellt.

5.5.1 Auflösung der Fertigungsaufträge

In einem ersten Schritt müssen aus den geplanten Aufträgen Kapazitätspakete für das Produktionssystem gebildet werden. Dazu wurden die Betriebsmittel innerhalb des Systems vereinfacht in zwei Kapazitätspakete aufgeteilt. Kapazitätspaket 1 umfasst nur eine Maschine, die anderen sechs Maschinen sind in ihrer technologischen Leistungsfähigkeit so ähnlich, dass sie zu einem Kapazitätspaket 2 zusammengefasst werden können.

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung wurde der Auftragsbestand für einen Planungshorizont von drei Jahren über die Stücklisten aufgelöst und auf die Kapazitätspakete verteilt. Die ermittelte Kapazitätsbelastung enthält die konkreten Aufträge sowie einen prognostischen Anteil an Fertigungsaufträgen, der sich aus vergangenheitsbezogenen Erfahrungswerten sowie einem Erwartungswert für die zukünftige Geschäftsentwicklung ergibt. Zur einfacheren Handhabung und Kalkulation der unterschiedlichen Teilevarianten wurde das gefertigte Teilespektrum der vergangenen sechs Monate als eine Referenzeinheit (vgl. Kapitel 4.4) definiert und für die weiteren Planungen zugrunde gelegt.

Aus den Fertigungsaufträgen werden über die in der PPS hinterlegten Arbeitspläne die entsprechenden Soll-Kapazitäten ermittelt und zu entsprechenden Kapazitätspaketen zusammengestellt. Diese enthalten neben den Hauptzeiten auch die Zeitanteile für die erforderlichen Rüstvorgänge sowie einen unternehmensinternen Zuschlagssatz für die zu erwartenden technischen Verluste und für Verkettungsverluste, die sich aus der Mehrmaschinenbedienung des Personals ergeben (hier pauschaler Zuschlag 20%).

Die Systemnutzungszeit umfasst in der Woche 10 Schichten mit einer Kapazität von jeweils 7,75 Stunden. Über dieses Schichtmodell ergibt sich so in Verbindung mit dem Betriebskalendar eine Nennkapazität von den 1860 Stunden pro Maschine für den Planungszeitraum. Das Kapazitätspaket 2 enthält sechs Maschinen, so dass in diesem Paket insgesamt 11160 Stunden als Nennkapazität zur Verfügung stehen. In Abb. 5-3 sind die gebildeten Kapazitätspakete in einer Übersicht dargestellt. Aus der Darstellung wird deutlich, dass eine ausreichende Nennkapazität zur Bearbeitung der Aufträge (Sollkapazität) vorhanden ist.

Weiterhin wird deutlich, dass die Reduktion der Verlustzeiten ein großes Potential zur Optimierung der Systemkonfiguration darstellt.

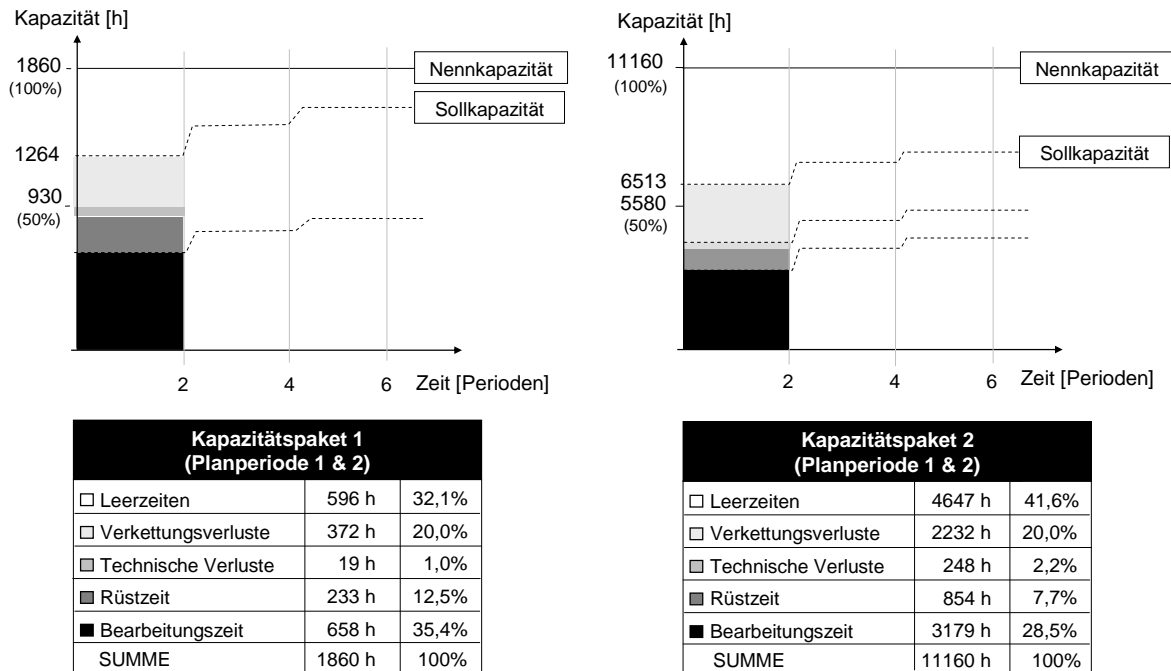


Abb. 5-3: Bildung der Kapazitätspakete

5.5.2 Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen

Gemäß der Klassifikation aus Abb. 4-6 stellen die dargestellten Kapazitätspakete den Fall 2 dar. Demnach handelt es sich hierbei um potentialbehaftete Kapazitätspakete, bei denen als strategischer Optimierungsansatz die Reduktion der Nennkapazität angestrebt werden muss. Ansätze zur Anpassung der Systemkonfiguration liegen daher nur in der Reduktion der Personalkapazität und in der effizienteren Ressourcennutzung innerhalb der Belegungszeiten. Als generelle Ansatzpunkte müssen daher neben den Schichtmodellen auch die Mitarbeiteranzahl in einer Schicht auf Rationalisierungspotentiale untersucht werden. Weiterhin beinhalten die Ressourcenzeiten Einsparpotentiale, deren generelle Auswirkungen auf die Kapazitätssituation vorab untersucht werden müssen. Im Folgenden wird dies nur für das Kapazitätspaket 2 weiter dargestellt, da dies die größten Potentiale verspricht.

Im ersten Schritt müssen zunächst die ungenutzten Kapazitäten untersucht werden. Hierbei wird deutlich, dass diese im Kapazitätspaket 2 mehr als 40% betragen. Daher wurde für dieses Paket zunächst eine Kapazitätsreduktion auf 6510 Stunden über das Schichtmodell angesetzt. Dies bedeutet, dass fünf der sechs Maschinen im 1-Schichtbetrieb betrieben werden können. Abb. 5-4 stellt diesen Sachverhalt für das Kapazitätspaket 2 graphisch dar.

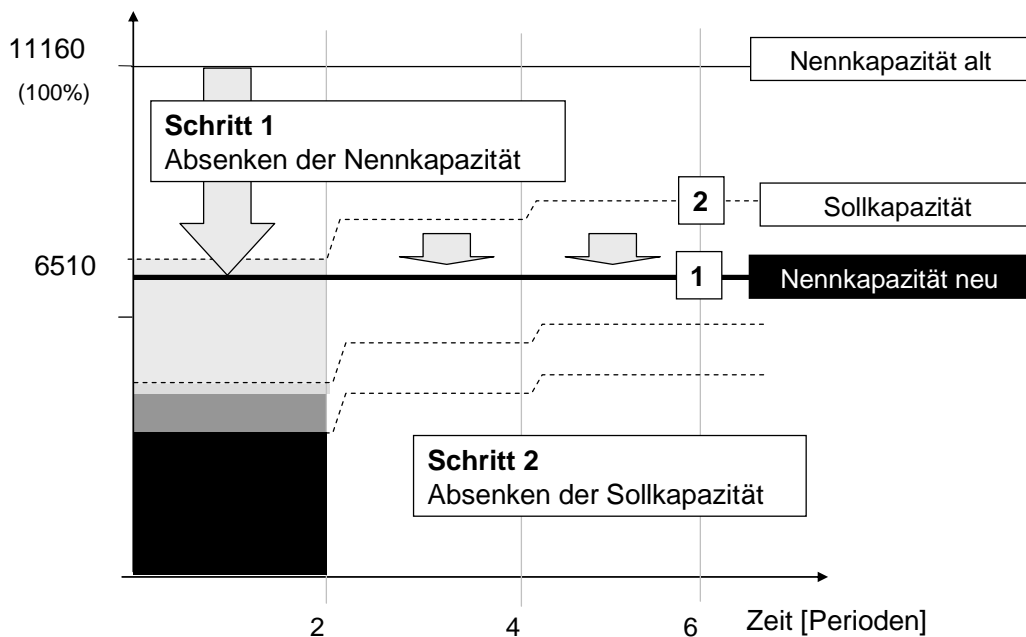


Abb. 5-4: Strategie zur Kapazitätsanpassung für Kapazitätspaket 2

Schritt 1 zeigt die Reduktion der Nennkapazität des Systems um über 40%. Im zweiten Schritt muss jetzt über eine Gradientenbetrachtung untersucht werden, wie die Sollkapazität kostenoptimal auf die Nennkapazität abgesenkt werden kann, um die vorhandenen Überkapazitäten zu kompensieren. Zur Identifikation geeigneter Handlungsstrategien muss nun eine Betrachtung der Hebelwirkung von einzelnen Maßnahmen (Trade-offs) durchgeführt werden. Die Betrachtung der jeweiligen Gradienten ergab, dass unter der Prämisse gleich bleibender Betriebsmittelkapazitäten die Stellhebel auf der Kostenseite in einer Reduktion der Personalkapazitäten sowie in der Reduktion der Verlustzeiten und Rüstzeiten liegen. Maßnahmen zur Reduktion dieser Zeiten sind daher grundsätzlich geeignet, sowohl den exakten Kapazitätsabgleich herzustellen, wie auch weitere Kostensenkungen zu induzieren. Um die Wirkung der Ansätze auf die Systemleistung zu evaluieren, wurde in Abstimmung mit den betroffenen Bereichen ein zukünftiger Sollzustand des Produktionssystems definiert.

Als realistische Zielvorgaben wurden dazu folgende Änderungen gegenüber der Ausgangssituation vereinbart:

Einführung eines neuen Schichtmodells

Die Belegung der fünf Betriebsmittel erfolgt in fünf Schichten pro Woche (1-Schicht Betrieb) mit jeweils 7,75 Stunden/ Schicht für das Kapazitätspaket 2. Ein Betriebsmittel aus Kapazitätspaket 2 sowie das Kapazitätspaket 1 werden weiterhin im 2-Schicht Betrieb mit einem Werker belegt.

Reduktion der Personalkapazität

Bisher wurde das Modell mit einer durchschnittlichen Personalkapazität von 5,7 betrieben. Über die Simulation wird die kostenoptimale Personaleinsatzmenge identifiziert, mit der die geforderte Auftragslast gerade noch innerhalb der festgelegten Rahmenbedingungen gefertigt werden kann.

Reduktion der Verlustzeiten

Die Verkettungsverluste sowie die Rüstzeiten wurden vorkalkulatorisch um 10% bzw. 30% verringert, um die Auswirkungen dieser Zeiteinsparungen zu evaluieren.

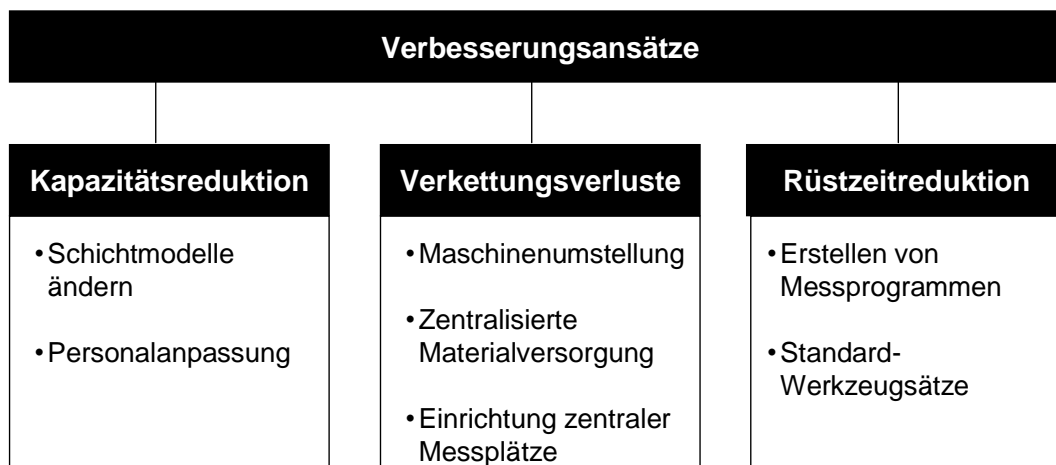


Abb. 5-5: Übersicht über das Gesamtpaket von Verbesserungsmaßnahmen

Die dargestellten Zielvorgaben sollen durch die in Abb. 5-5 dargestellten Maßnahmenpakete erreicht werden. Diese wurden in KVP Workshops mit den beteiligten Bereichen erarbeitet, so

dass an dieser Stelle die in Kapitel 2.3.2 dargestellten Methoden zur Initiierung von Verbesserungsprozessen eingesetzt werden konnten.

5.5.3 Simulation von alternativen Produktionsszenarien

Zur Auswertung der Systemleistung wurde das Verhalten des Produktionssystems unter den Verbesserungsansätzen im Simulationswerkzeug WITNESS abgebildet und untersucht.

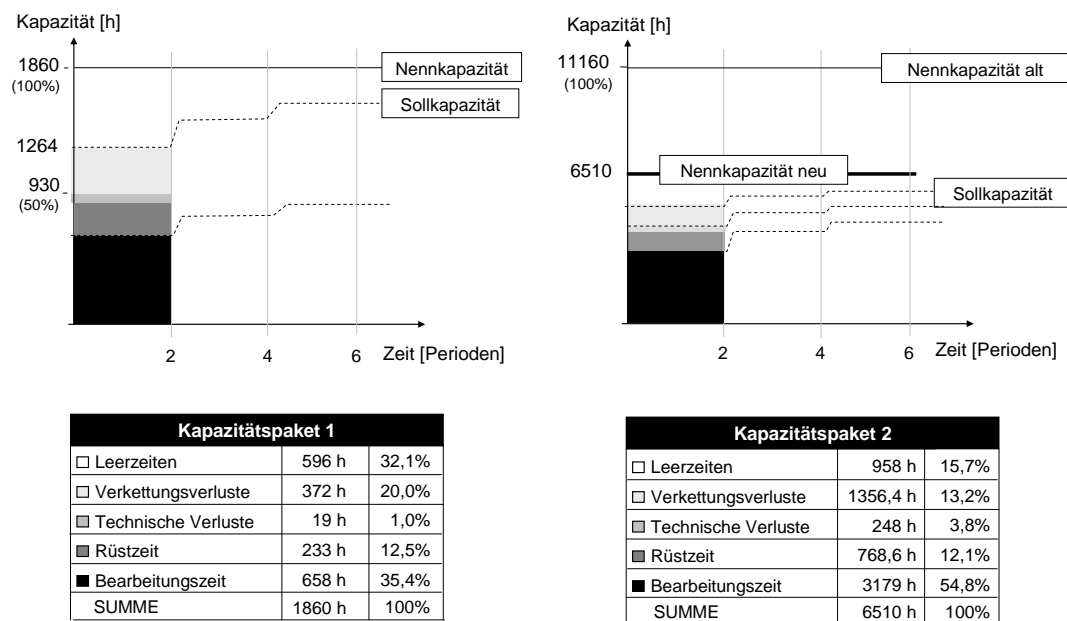


Abb. 5-6: Darstellung der Simulationsergebnisse

Das Ergebnis für die vollständige Auftragsbearbeitung unter minimaler Personalkapazität ist in Abb. 5-6 dargestellt. Die Abbildung beschreibt das Szenario, bei dem Kapazitätspaket 1 und eine Anlage von Kapazitätspaket 2 zweischichtig mit einer Person (Mehrmaschinenbedienung) betrieben werden. Die verbleibenden fünf Betriebsmittel werden von drei Werkern im 1-Schicht Betrieb mit Mehrmaschinenbedienung gefahren. Dies bedeutet eine Einsparung von ca. 30% der bislang erforderlichen Personalkapazität. Durch die Simulationsläufe konnte verifiziert werden, dass durch die Rationalisierungsmaßnahmen die Auftragsabarbeitung unter der neuen Nennkapazität für den Planungshorizont von sechs Perioden durchgeführt werden kann.

5.5.4 Bewertung geeigneter Handlungsstrategien

In Analogie zu den dargestellten Schritten zur Bewertung von Handlungsstrategien in Kapitel 4.4 muss das Resultat der durchzuführenden Maßnahmen sowohl auf die kurz- bis mittelfristige Wirkung auf die Stückkosten als auch bezüglich der langfristigen Wirtschaftlichkeit beurteilt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

1. Schritt: Kurzfristiger Vergleich der Fertigungskosten

Die kostentechnische Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass sich durch das angenommene Paket von Verbesserungsmaßnahmen die Stückkosten für eine Referenzeinheit um 40,41% reduzieren lassen. Die Realisierung dieser Potentiale erfordert jedoch zunächst zusätzliche Zahlungsflüsse (Investitionen) für die Umsetzung der Maßnahmen. Daher müssen die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Maßnahmen durch Amortisationsrechnungen abgesichert werden.

2. Schritt: Langfristige Wirtschaftlichkeitsrechnung

Für die Umsetzung kommen gemäß Kapitel 4.5 nur diejenigen Maßnahmen in Betracht, die eine Senkung der Stückkosten bewirken und deren Wirtschaftlichkeit innerhalb des geforderten Amortisationszeitraums liegt.

Unter diesen Nebenbedingungen wurden daher die Maßnahmen zur Einrichtung von zentralisierten Messplätzen (kein Kostensenkungspotential) und die Einrichtung von Standardwerkzeugsätzen (keine langfristige Wirtschaftlichkeit) für die Umsetzung nicht berücksichtigt. Alle anderen Maßnahmen erfüllen die in der Methodik aufgestellten Kriterien zur Wirtschaftlichkeit und liegen innerhalb des zur Verfügung stehenden Kapitalrahmens der Unternehmensleitung. Zeitlich gesehen können alle wirtschaftlichen Maßnahmen gleichzeitig zu Beginn des Planungszeitraums umgesetzt werden. Dies erfordert jedoch zunächst Investitionsmittel für einige Rationalisierungsmaßnahmen, die sich erst in späteren Perioden durch die erzielten Einspareffekte amortisieren.

Als zulässiger Amortisationszeitraum wurde ein Zeitraum von maximal zwei Jahren (vier Halbjahre) durch die Geschäftsleitung festgelegt. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5-7 noch einmal graphisch dargestellt. Die Bewertung ergab, dass zur Durchführung des Maßnahmenpaketes ein zusätzlicher Kapitalbedarf gegenüber dem bestehenden Ausgangsszenario von

insgesamt 17,3 % erforderlich ist. Innerhalb der vier Perioden kann zudem noch eine kumulierte Einsparung von insgesamt 71% auf die eingesetzte Kapitalmenge erreicht werden.

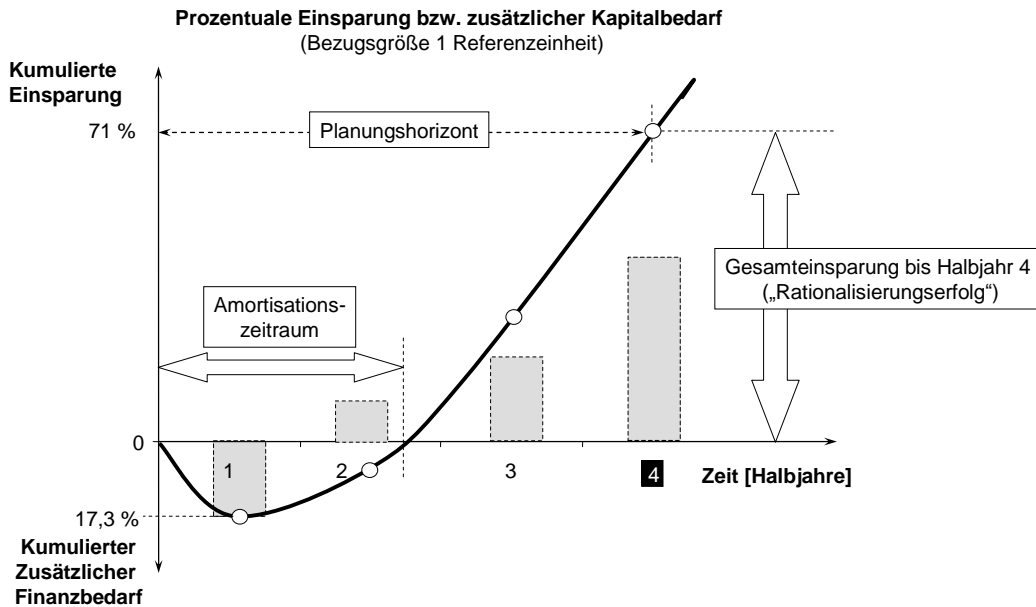


Abb. 5-7: Amortisationsrechnung zur Bestimmung der Pay-back Period

Diese Einsparung kann auch als Rationalisierungserfolg aufgefasst werden. Aus diesem Grund sind die identifizierten Maßnahmen aus den jeweiligen Bereichen durchaus innerhalb der geforderten Grenzen.

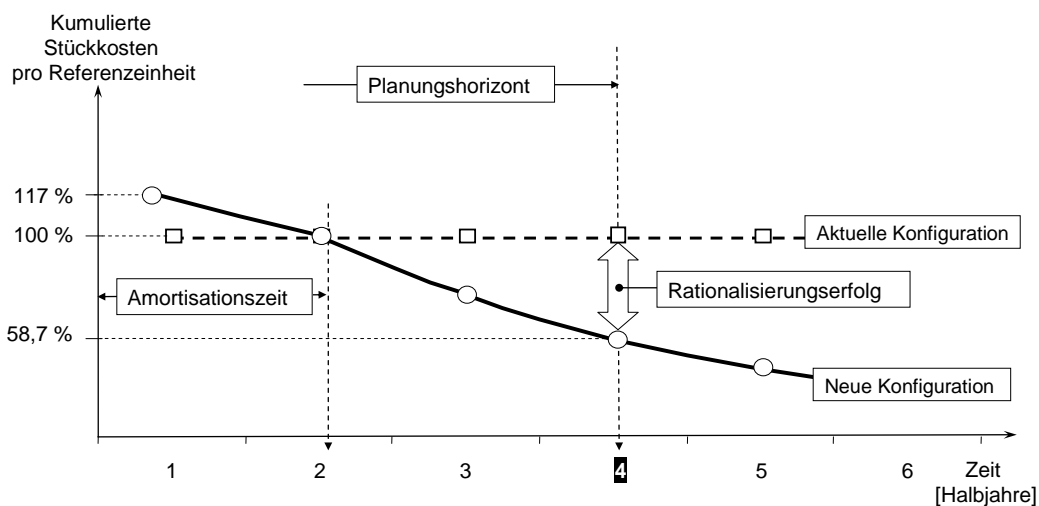


Abb. 5-8: Erreichte Einsparungen im Vergleich zu empirischen Erfahrungskurve

Abb. 5-8 zeigt die Entwicklung der kumulierten Stückkosten auf, die sich durch die Umsetzung der dargestellten Szenarien realisieren lassen.

Die zunächst höheren Stückkosten werden durch die Kosteneinsparungen über den weiteren Zeitverlauf mehr als kompensiert.

Der geforderte Amortisationszeitraum (Pay-back) liegt bei ca. 1,25 Jahren (2,5 Perioden), so dass schon innerhalb der geforderten vier Halbjahre ein erheblicher Rationalisierungserfolg erzielt werden kann. Über einen Zeitraum von zwei Jahren lassen sich so die Stückkosten auf ein Niveau von 58,7% des Ausgangszustandes reduzieren.

Damit kann durch die Systemoptimierung insgesamt ein Rationalisierungsgewinn in Höhe von 41,3% erzielt werden.

5.5.5 Auswahl und Umsetzung konkreter Maßnahmen

Aufgrund der Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit wurden die folgenden Verbesserungsmaßnahmen für die Optimierung des Produktionssystems ausgewählt:

- Reduktion der Schichten
- Reduktion der Personalstärke
- Umstellung der Maschinen
- Zentralisierte Materialversorgung der Maschinenbediener
- Erstellung von Messprogrammen

Die operative Umsetzung der Maßnahmen wurde in den jeweils betroffenen Bereichen angestoßen und ist mittlerweile erfolgt. Damit wurde die in Bezug auf die Auftragslage optimierte Systemkonfiguration erfolgreich innerhalb des Produktionssystems umgesetzt.

5.5.6 Betriebsdaten zur Systemüberwachung

Für die Planung und Darstellung der Systemfertigungskosten wurden die neuen Personaleinsatzzeiten und Maschinenstundensätze sowie die Gemeinkostensätze im Modell hinterlegt.

Durch die Betriebsdatenerfassung zeigte sich, dass die (vorkalkulatorisch) geplanten Ablaufarten des Systems mit der Nachkalkulation weitgehend übereinstimmen.

Große Abweichungen traten in der Nachkalkulation bei der Analyse der tatsächlichen Ausführungszeiten für die einzelnen Aufträge auf. Über die betriebliche Datenerfassung zeigte sich in der Nachkalkulation, dass entgegen der ursprünglichen Planung von 20% die Wartezeiten der Maschinen durch die eingeleiteten Verbesserungsmaßnahmen nur noch ca. 13% der Belegungszeit betragen. Diese Verluste entstehen durch die kurzen Bearbeitungszeiten und die

dadurch erforderlichen Werkstückwechsel. Diese Zeiten konnten bisher vorkalkulatorisch nicht erfasst und transparent dargestellt werden.

Weiterhin zeigte sich, dass durch die erheblichen Rüstzeiten die Durchlaufzeiten stark anstiegen. Die Ist-Zeiten übersteigen dabei die Planzeiten für das Rüsten um ein Vielfaches. Aufgrund der hohen Abweichungen zu den Planungsannahmen wurden diese Zeiten jedoch nicht in das System übernommen. Stattdessen wurde dieses Ergebnis dazu verwandt, tiefer gehende Rüstzeitanalysen zu initiieren, um im Rahmen der betrieblichen KVP Aktivitäten diese Verlustquelle zu beseitigen.

5.6 Abschließende Bewertung der eingesetzten Methodik

Die entwickelte Methodik zum Life Cycle Controlling konnte bei dem Unternehmen zur Planung und Identifikation von Rationalisierungspotentialen im betrachteten Produktionssystem eingesetzt werden. Durch die Schaffung eines Regelkreises von Plan- und Ist-Produktionsdaten konnten Ressourcenverschwendungen identifiziert und Maßnahmen zur Reorganisation auf ihre Kostenwirksamkeit hin evaluiert werden. Die ermittelten Kostensenkungen stellen somit Erfahrungseffekte dar, die durch die Anwendung der Methodik initiiert wurden. Abb. 5-9 zeigt die durchschnittlich erzielbaren Kostensenkungen durch die Implementierung der aufgezeigten Maßnahmen über einen Planungszeitraum von zwei Jahren.

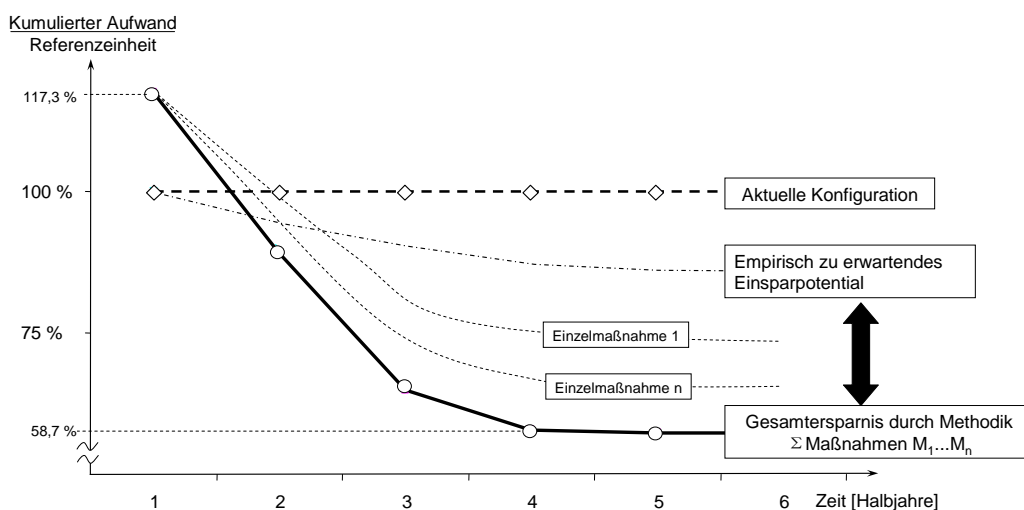


Abb. 5-9: Methodenerfolg im Vergleich zu empirischen Erfahrungskurven

Dazu wurde als Referenzprodukteinheit für die Kalkulation ein Teilespektrum von 6 Monaten zugrunde gelegt. Die daraus resultierenden neuen Ressourcen- und Systemkostensätze sowie

die technisch/organisatorischen Veränderungen werden im Systemmodell für künftige Planungszyklen aktualisiert. Die Prognose der Kostensenkungen dient als Zielpfad (Benchmark) für das kontinuierliche Systemcontrolling über den weiteren Systemlebenslauf. In der Abbildung ist auch die Effektivität der Methodik im Vergleich zu empirischen Erwartungswerten bezüglich der Lernraten dargestellt.

Für den Vergleich wurde aus der Literatur [WES06], [WER01] eine Lernrate für den Betrieb von Produktionssystemen mit spanender Bearbeitung herangezogen. Es wird deutlich, dass die Anwendung der Methodik Unternehmen befähigt, ihre Produktionssysteme mit wesentlich steileren Erfahrungskurven zu betreiben. Die Gesamtlernrate ergibt sich aus der Summe der durch die einzelnen Maßnahmen induzierten Einspareffekte. Insgesamt konnte so eine Reduktion der Stückkosten von insgesamt ca. 41% erzielt werden. Diese Reduktion entspricht einem Einsparpotential von ca. 800.000 € über zwei Jahre.

Zusammenfassend zeigte sich, dass die durch die konsequente Anwendung der Methodik realisierbaren Einsparungen weit über dem liegen, was im Rahmen der allgemeinen innerbetrieblichen Anstrengungen zur Rationalisierung empirisch zu erwarten wäre. Die über den Bilanzzeitraum erzielten Kosteneinsparungen führen so zu nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen gegenüber Mitbewerbern, die vor allem durch das schnellere Durchlaufen von steileren Erfahrungskurven ausgelöst werden.

6 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen in der Serienfertigung stehen heute im globalen Wettbewerb um potenzielle Kunden und Aufträge. Dabei sind die Märkte durch volatile Kundenbedürfnisse gekennzeichnet. Dies bedeutet für die Unternehmen ein permanentes Agieren mit dem Wandel, um unter den turbulenten Marktbedingungen bestehen zu können. Die verkürzten Marktzyklen der Produkte erfordern dazu im Kern wandlungsfähige Produktionssysteme und methodisch unterstützte Planungssysteme, mit denen die dynamischen Änderungen der Auftragsstrukturen produktions- und kostentechnisch beherrscht werden können. Die hohen Kosten für die eingesetzten Produktionsressourcen erfordern jedoch auf der anderen Seite langfristige Planungshorizonte zur nachhaltigen Absicherung und optimalen Ausnutzung der geplanten Investitionen.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es daher, eine Methodik zur kontinuierlichen Kostenoptimierung von Produktionssystemen in Abhängigkeit der geplanten Ausbringungsmenge im Bereich der Serienfertigung bereitzustellen. Dazu wurde ein Regler entwickelt, mit dem der kostenoptimale Betriebspunkt über ein regelkreisbasiertes Controllingmodell eingestellt werden kann. Durch das Modell wird der Nutzer befähigt, potentielle Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit vorab zu bewerten. Dazu wird die aktuelle Systemkonfiguration mit den eingesetzten Ressourcen und Wirkzusammenhängen in einer simulationsbasierten Planungsumgebung erfasst und abgebildet. Die erforderlichen Daten werden über die verschiedenen Systeme aus der betrieblichen Datenerfassung in das Planungssystem eingespielt.

Im Unterschied zu den bislang bekannten Steuerungsansätzen steht jedoch nicht die Einplanung der Aufträge für ein gegebenes System im Vordergrund. Gegenstand des Reglermodells ist vielmehr die optimale Konfiguration eines Produktionssystems in Abhängigkeit der vorliegenden Auftragsbelastung für einen Planungszeitraum. Damit wird die strukturelle Gestaltung des Produktionssystems selbst Inhalt der Optimierung.

Die entwickelte Methodik unterstützt hierbei die gezielte und kontinuierliche Forcierung von Lernprozessen durch die Anwendung von Simulationswerkzeugen.

Dies ermöglicht es, alternative Produktionsszenarien schneller zu evaluieren und durch die virtuelle Implementierung von Maßnahmen schon vorab aus der „Zukunft“ zu lernen.

In der Methodik werden dazu zunächst die Auftragsdaten und Betriebsinformationen bezüglich der aktuellen Systemkonfiguration aus verschiedenen Quellen der betrieblichen Informationssysteme zusammengeführt. Nachdem das Eigenfertigungsprogramm durch die PPS festgelegt wurde, werden die Fertigungsaufträge jedoch nicht in die Feinplanung überführt, sondern in ihre einzelnen Bearbeitungsprozesse zerlegt, die summarisch zu Kapazitätspaketen zusammengefasst werden. Ein Kapazitätspaket beinhaltet eine oder mehrere Maschinen, mit denen technologisch vergleichbare Prozessergebnisse erzielt werden können. Über die Planzeiten aus der Arbeitsvorbereitung können so die erforderlichen Belegungszeiten je Kapazitätspaket ermittelt werden.

Die Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen erfolgt dann über die Analyse der Ablaufarten in den Kapazitätspaketen über den gesamten Planungszeitraum. Dabei werden zunächst die kritischen bzw. potentialbehafteten Arbeitspakete ermittelt. Diese sind durch einen Kapazitätsengpass bzw. durch freie, ungenutzte Kapazitäten gekennzeichnet. Die möglichen Kapazitätssituationen sowie die sich jeweils daraus ableitenden strategischen Handlungsoptionen wurden dazu über eine Morphologie abgebildet.

Die Abstimmung der Soll- und Nennkapazitäten führt in einem ersten Schritt zu einem effizienten Betriebspunkt des Produktionssystems. Im zweiten Schritt erfolgt die Erstellung einer Produktionsfunktion für das untersuchte Kapazitätspaket unter Betrachtung der erforderlichen Ressourcenzeiten und -kosten. Über die Gradientenbetrachtung können so die Hebelwirkungen und Trade-offs von potentiellen Verbesserungsansätzen an den einzelnen Faktoren abgelesen werden. Über diesen Schritt wird somit eine Systemmigration in Richtung des optimalen Betriebspunktes erreicht.

Die in diesen beiden Schritten identifizierten Verbesserungsansätze werden dann im Simulationsmodell vorkalkulatorisch abgebildet und hinsichtlich ihrer zeitlichen und kostentechnischen Wirkung bewertet. Maßnahmen, die die unternehmensindividuellen Wirtschaftlichkeitskriterien erfüllen, werden dann zur Umsetzung innerhalb des Produktionssystems freigegeben. Die Umsetzung dieser Maßnahmen führt zu prognostizierten Erfahrungs- und Lernkurveneffekten, die sich in einer Degression der Stückkosten niederschlagen.

Diese Kostenkurve bildet später die Bezugslinie (Benchmark), gegen die das laufende Controlling der Systemleistung erfolgt. Für die Systemüberwachung wurden dazu relevante Daten spezifiziert, die aus den verschiedenen Quellen der Betriebsdatenerfassung (MDE, QDE, PDE) und der PPS für die Planung, Betriebsüberwachung und Systemoptimierung bereitgestellt werden. Die im Rahmen der Nachkalkulation ermittelten Abweichungen zu den Planzeiten und Kosten geben Hinweise auf Ineffizienzen und Verschwendungen innerhalb des Systems. Das kontinuierlich aktualisierte Systemmodell liefert somit die Basis für zukünftige Planungs- und Optimierungszyklen.

Durch die Kopplung der Plandaten mit den Ist-Daten entsteht so ein Life Cycle Controlling-Regelkreis, mit dem Produktionssysteme kontinuierlich über den Lebenslauf geplant, optimiert und überwacht werden können.

Die entwickelte Methodik wurde in einem Projekt für einen Serienhersteller von Elektrowerkzeugen eingesetzt und für das Life Cycle Controlling eines Produktionssystems zur spanenden Bearbeitung implementiert. Dabei zeigte sich, dass durch die Systemsicht der Methodik nicht nur Zeitgewinne bei der Analyse alternativer Rationalisierungsszenarien entstehen, sondern auch qualitative Steigerungen der ermittelten Lösungen in Hinblick auf die Güte und Belastbarkeit (Validität) der ermittelten Kostenoptimierung erreichbar sind.

Durch die methodische Unterstützung wurde das Unternehmen befähigt, wesentlich größere Kostendegressionen zu erzielen, als dies durch empirisch belegte Lernkurven durchschnittlich zu erwarten gewesen wäre. Die praktische Anwendung des Reglungmodells befähigt Unternehmen somit, steilere Erfahrungskurven in der Produktion zu erzeugen. Durch die höhere Lerngeschwindigkeit können komparative Kostenvorteile realisiert werden, die zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens beitragen.

Die entwickelte Methodik stellt die kostenoptimale Synchronisation der Fertigungsaufträge mit dem Produktionssystem in den Mittelpunkt der Betrachtung. Ein weiterer Forschungsbedarf liegt daher in der Integration marktseitiger Einflussfaktoren, die sich auf der Erlösseite in volatilen Produktpreisen niederschlagen. Die Methodik müsste dazu um zusätzliche Zielfunktionen und Strategien der marktseitigen Preisbildung erweitert werden, so dass nicht mehr die Produktion auf einem optimierten Kostenniveau, sondern vielmehr die kontinuierliche Einstellung eines optimalen Rentabilitätsniveaus der Produktion das Ziel der lebenslauf-

orientierten Optimierungen bildet. Weitere Forschungsfelder ergeben sich durch die Aufweitung des Bilanzrahmens in horizontaler oder vertikaler Dimension. Dazu könnte die Methodik horizontal um die Optimierung mehrerer logistisch verketteter Produktionssysteme zur Einstellung optimaler Prozessketten erweitert werden. Durch die vertikale Integration weiterer Hierarchieebenen ergäbe sich eine zusätzliche Option zur Einstellung optimaler Unternehmenseinheiten. Die Ausschöpfung dieser Reserven durch die übergeordnete Optimierung beinhaltet noch weit reichende Potentiale für die Zukunft.

Abstract

Today's manufacturing companies in series productions are open to global competition especially concerning the acquisition of potential customers and orders. These markets are characterized by volatile customer demands. Such companies need to react constantly to change in order to survive under these turbulent market conditions. Shortened product market cycles require adaptable manufacturing systems and method-based planning systems to master dynamic changes in order structures, both from a manufacturing and also a cost point of view. However, the high costs of the manufacturing resources implemented also demand long-term planning horizons in order to safeguard planned investments in a lasting way and to utilize them optimally.

The objective of this thesis was therefore to develop a method for the continuous optimization of manufacturing system costs in dependence upon planned output quantities in the field of series productions. To do this, a controlling concept has been developed which enables the optimum cost operating point to be adjusted using a controlling model based on control cycles. The model permits the user to identify potential improvement measures and to evaluate them in advance with regard to their profitability. To achieve this, the actual system configuration is acquired and depicted in a simulation-based planning environment together with the resources used and all interrelationships. The required data is imported into the planning system via the various operating data acquisition systems.

In contrast with known control concepts used up till now, order planning is not the central issue for a particular system. The role of the controller model is rather to ensure the optimum configuration of a manufacturing system in dependence upon existing orders for a period of planning time. In this way, the structural design of the manufacturing system also forms part of the optimization process.

Through the use of simulation tools, the method which has been developed supports the targeted and continuous promotion of learning processes. This makes it possible to evaluate alternative manufacturing scenarios faster and to learn from the "future" by implementing improvement measures.

With the method, all order data and operating information regarding the actual system configuration are first collected from various operational information system sources. Once in-plant production has been determined using PPC, manufacturing orders are not transferred to the fine-planning but are rather divided into their individual machining processes which, added up, then form capacitance packages. A capacitance package comprises one or more machines which can be used to attain technologically-similar process results. In this way, the required busy times per capacitance package can be determined via the planning times from the preparatory work.

Improvement measures are then identified by analyzing sequence types in the capacitance packages over the overall planning time. Here, critical work packages or those associated with potentials are first ascertained. These are characterized either by capacity bottlenecks or free, unused capacities. Conceivable capacity situations and corresponding strategic options for action derived from them are then represented using morphology.

In a first step, on aligning the desired and nominal capacities, an efficient operating point for the manufacturing system is found. In a second step - taking required resource times and costs into account - a manufacturing function is then drawn up for the capacitance package tested. On considering the gradients, it is possible to read off the leverage effects and trade-offs of potential improvement concepts for each factor. This step enables system integration in the direction of the optimum operating point.

The improvement concepts identified in these two steps are depicted in the simulation model as preliminary costing and are then evaluated with regard to their effects on costs and time. Measures fulfilling individual company profitability criteria are then released for implementation in the manufacturing system. These measures result in forecast experience and learning curve effects which are reflected in a degression of piece costs.

The cost curve later forms a reference line (benchmark) to continuously control the performance of the given system. To monitor the system, relevant data is specified which has been obtained from the various sources of operating data acquisition (MDA, QDA, PDC) and from PPC to plan, monitor operations and optimize the system. Any deviations regarding planning times and costs which have been ascertained from the final costing process give information about inefficiencies and wastages in the system. The constantly-updated model of the system thus forms a basis for future planning and optimization cycles.

By back-coupling planning data with actual data, a life cycle-orientated control cycle is formed which can be used to continuously plan, optimize and monitor manufacturing systems throughout their life cycle.

The method developed has been practically implemented in a project for a series manufacturer producing electrically drive tools as well as to control the life cycle of a manufacturing system for the series production of machinable components. The system view obtained using the method showed not only that time was saved by analyzing alternative rationalization scenarios but also that qualitative improvements could be achieved by implementing the solutions found with regard to the quality and toughness/rating (validity) of the cost optimization ascertained. As a result of this supporting method, the company was able to achieve considerably greater cost depressions as would have been attained on average using empirical learning curves. The practical application of the controlling model thus enables companies to achieve steeper learning curves in manufacturing. Due to the increased learning speed, comparative cost advantages can be realized which contribute towards safeguarding company competitiveness.

The method which has been developed places the cost-optimized synchronization of manufacturing orders with a specific manufacturing system in a central position. There is a further research requirement to integrate influencing factors concerning the market which are reflected as volatile product prices affecting profits. To do this, the method also needs to be extended by additional target functions and strategies regarding market price formation. Thus, the objective of life cycle-orientated optimization would no longer be to attain optimized production costs but rather to constantly adjust a system in order to ensure optimum manufacturing efficiency. Other research fields are also formed as a result of extending the balance sheet classification in a horizontal or vertical dimension. Here, the method could be extended horizontally to include the optimization of several logistically-interlinked manufacturing systems. The vertical integration of various hierarchical levels would yield an additional option for adjusting company units in an optimal way. This could be achieved by vertically integrating the method into superior system controls. By tapping of these reserves through superior optimization, far-reaching potentials for the future will be ascertained.

7 Literaturverzeichnis

- [ALR96] Al-Radhi, M.: Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen. Berlin : Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), 1996 (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin). zugl. Berlin, Techn. Univ., Inst. für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Diss., 1996
- [AND00] Anderl, R., Daum, B., John, H.: Produktdatenmanagement zum Management des Produktlebenszyklus. In: Industrie Management 16 (2000) Nr. 2, S. 10-14
- [AWF85] AWF/ REFA (Hrsg.): Integrierter EDV-Einsatz in der Produktion – Begriffe, Definitionen, Funktionszuordnungen. Eschborn: AWF – Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung e.V., 1985
- [BAL01] Balve, P.; Aupperle, G.: Prozeßorientierte Fertigungssegmentierung. In: Westkämper, E. (Hrsg.) u.a.: Montageplanung - effizient und marktgerecht. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001, S. 75-94
- [BAS03] Baszenski, N.: Methodensammlung zur Unternehmensprozess-Optimierung.: Köln: Wirtschaftsverlag Bachem, 2003 (Taschenbuchreihe des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft)
- [BAU01] Baumgart, P.: Lernkurve und Unternehmenswandel: Individuelle Verhaltenssteuerung von Mitarbeitern im Change Management. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2001
- [BEC02] Becker, J.; Neumann, S.; Hansmann, H.: Workflow-integrierte Produktionsplanung und -steuerung: Ein Architekturmodell für die Koordination von Prozessen der industriellen Auftragsabwicklung. Münster, 2002 (Arbeitsbericht des Institutes für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster; 85)
- [BEI01] Beitz, W. (Hrsg.); Grothe, K.-H. (Hrsg.); Dubbel, H. (Begr.): Taschenbuch für den Maschinenbau - Dubbel. 20., völlig Neubearb. und erw. Aufl.. Berlin u.a.: Springer, 2001

- [BLZ05] Balzert, Helmut: Lehrbuch Grundlagen der Informatik : Konzepte und Notationen in UML 2, Java 5, C++ und C#, Algorithmik und Software-Technik, Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg; Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2005 (Lehrbücher der Informatik)
- [BRA05] Braatz, Arnulf: Entwicklung einer Methode zur objektorientierten Spezifikation von Steuerungen. Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2005 (IPA-IAO Forschung und Praxis 423). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2005
- [BRE05] Brecher, C., Possel-Dölken, F.: Modellierung flexibler Fertigungssysteme – Neue Datenmodelle für die MES – und Leitebene. In: Wt werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 7/8, S. 594-602
- [BRI02] Briel, R. von: Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2002 (IPA-IAO Forschung und Praxis 352). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2002
- [BUL03] Bullinger, H.-J. (Hrsg.); Warnecke, H. J. (Hrsg.); Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management. 2., neubearb. u. erw. Aufl.. Berlin u.a.: Springer, 2003
- [COE99] Coenenberg, A. G. et al.: Grundlagen und Instrumente des Produktcontrolling. In: Eversheim, Walter (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.); Akademischer Verein Hütte: Produktion und Management / CD-ROM. 7., völlig neubearb. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 1999, S. 8-1 – 8-69
- [COE03] Coenenberg, A. G.: Kostenrechnung und Kostenanalyse, 5., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2003
- [COR00] Corsten, H.: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 9., überarb. und wesentlich erw. Aufl.. München: Oldenbourg, 2000 (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre)
- [DAE99] Daenzer, W. F. (Hrsg.); Huber, F. (Hrsg.): Systems Engineering: Methodik und Praxis. 10., durchges. Aufl.. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1999
- [DEL03] Delfmann, W., Neumann, C.-S., Schwegmann, V.: Erfolgreiche Logistikstrategien mithilfe von IT. München: TCW Transfer-Centrum, 2003

- [DEN05] Denkena, B., u.a.: Können teurere Werkzeugmaschinen auf längere Sicht günstiger sein? In: *Wt werkstattstechnik online* 95 (2005), Nr. 7/8, S. 519-523
- [DIN6300] Norm DIN 6300 1970-06: Vorrichtungen für formändernde Fertigungsverfahren; Benennungen und deren Abkürzungen
- [DIN8580] Norm DIN 8580 2003-09: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
- [DIN19226] Norm DIN 19226-1 1994-02, Leittechnik; Regelungstechnik und Steuerungstechnik
- [DIN60300] Norm DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement- Teil 3-3: Anwendungsleitfaden- Lebenszykluskosten
- [DOH01] Dohms, R. P.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Aachen: Shaker, 2001 (Berichte aus der Produktionstechnik 11/2001). Zugl. Aachen, RWTH, Fak. für Maschinenwesen, Diss., 2000
- [EIG01] Eigner, M., Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Berlin u.a.: Springer, 2001
- [EVE99a] Eversheim, W. (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.): Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin u.a.: Springer, 1999 (Produktion und Management 3)
- [EVE99b] Eversheim, W. (Hrsg.); Schuh G. (Hrsg.): Betrieb von Produktionssystemen. Berlin u.a.: Springer, 1999 (Produktion und Management 4)
- [EVE03] Eversheim, W. (Hrsg.): Innovationsmanagement für technische Produkte. Berlin u.a.: Springer, 2003 (VDI-Buch)
- [FEG02] Feggeler, A.; Neuhaus, R.: Was ist neu an ganzheitlichen Produktionssystemen?. In: Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e.V.: Ganzheitliche Produktionssysteme-Gestaltungsprinzipien und deren Verknüpfung. Köln: Wirtschaftsverlag Bachem, 2002, S. 18-26
- [FEL01] Feldmann, K.; Slama, S.: Highly Flexible Assembly – Scope and Justification. In: *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 50 (2001) 2, S. 489-498
- [FLE04a] Fleischer, J. u.a.: Life-Cycle-Performance in der Produktionstechnik. In: *VDI-Z* 146 (2004), Nr. 10, S. 87-90
- [FLE04b] Fleischer, J.; Nesges, D.: Sicherung operationeller Verfügbarkeiten durch Maschinenlieferanten. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (2004), Nr. 9, S. 702-706

- [FLE05] Fleischer, J.; Weismann, U.; Schmalzried, M.; Wawerla, M.: Bewertung der Life Cycle Performance. In: Wt werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 7/8, S. 559-563
- [FOE04] Förstemann, M.: Optimierung der Architektur moderner ziviler Flugtriebwerke zur Verbesserung der Lebenswegkosten. Stuttgart, 2004. Stuttgart, Univ., Fak. Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Diss. 2004
- [GAU02] Gaugler, E.: Taylorismus und Technologischer Determinismus. In: Albach, H. (Hrsg.); Kaluza, B. (Hrsg.); Kersten, W. (Hrsg.): Wertschöpfungsmanagement als Kernkompetenz, Wiesbaden: Gabler, 2002, S. 165-181
- [GER98] Gerhardt, A.; Kurth, J.: Zum Engineering der Systemkosten im Maschinen- und Anlagenbau. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 93 (1998), Nr. 9, S. 399-402
- [GIE01] Giesecke, H.: Einführung in die Pädagogik. Neuausg., 6. Aufl.. Weinheim; München: Juventa-Verl., 2001
- [GRI99] Griffel, Nils: Prozeßkette Ablaufsimulation – Voraussetzung zur systematischen Planung komplexer Produktionssysteme mit hohem Nutzungsgrad. München : Hieronymus, 1999 (Forschungsberichte utg 4). Zugl. München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1999
- [GRO03] Grosser, H.: Erschließung von Kreativitätspotentialen. In: In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.); Warnecke, H. J. (Hrsg.); Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management. 2., neubearb. u. erw. Aufl.. Berlin u.a.: Springer, 2003, S. 1035-1047
- [GUE03] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 5., verb. Aufl., Berlin u.a.: Springer, 2003
- [HAT01] Hartmann, E. H.: TPM Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement: Stillstandzeiten verringern, Maschinenleistungen steigern, Betriebszeiten erhöhen. 2. Auflage, Landsberg/Lech: verlag moderne industrie, 2001
- [HEI06] Heisel, U.: Intelligente Produktion – Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Geißinger, J.: Forschung stärken - Produktion sichern. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Engelbert Westkämper. Berlin u.a., Springer, 2006
- [HEN84] Henderson, B. D.: Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie. 2., überarb. Aufl.. Frankfurt/M.: Campus, 1984

- [HIB91] Hieber, W. L.: Lern- und Erfahrungskurveneffekte und ihre Bestimmung in der flexibel automatisierten Produktion. München: Vahlen, 1991 (Controlling Praxis). Zugl. Stuttgart, Univ., Diss. 1990
- [HIE01] Hieber, R. (Hrsg.); Schönsleben, P. (Hrsg.): Supply Chain Management: A Collaborative Performance Measurement Approach. Zürich: vdf-Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2001 (Research Reports for Industrial Practice 12). Zugl. Zürich (Schweiz), Eidgenössische Techn. Hochsch., Diss. 2001
- [HIS02] Hinrichsen, S.: Ganzheitliche Produktionssysteme - Begriff, Funktionen, Stand der Umsetzung und Erfahrungen. In: FB/IE - Zeitschrift für Unternehmensentwicklung und Industrial Engineering 51 (2002), Nr. 6, S. 251-255
- [HOR99] Horváth, P.: Bewertungsinstrumente des Produktionscontrolling. In: Eversheim, Walter (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.); Akademischer Verein Hütte: Produktion und Management / CD-ROM. 7., völlig Neubearb. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 1999, S. 18-1-18-32
- [ISO10303] Norm ISO 10303 1994: Product data representation and exchange.
- [JUN03] Jung, H.: Controlling. München; Wien: Oldenbourg, 2003
- [KIM00] Kimura, F.: A Methodology for Design and Management of Product Life Cycle Adapted to Product Usage Modes. In: CIRP; Kungliga Tekniska Högskolan <Stockholm>/The Royal Institute of Technology: The Manufacturing System in its Human Context - a Tool to Extend the Global Welfare : Proceedings of the 33rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, June 5-7, 2000, Stockholm, Sweden, S. 139-142
- [KOR04] Korge, A.; Scholtz, O.: Ganzheitliche Produktionssysteme, Produzierende Unternehmen innovativ organisieren und führen. In: Wt werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 1/2, S. 2-6
- [KRU00] Krüger, Thomas: Nutzungssteigerung verketteter Produktionssysteme. Düsseldorf : VDI Verlag, 2000 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2 549). Zugl. Hannover, Univ., Fak. für Maschinenwesen, Inst. für Fabrikanlagen, Diss. 2000
- [KUR03] Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung: Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 5., durchges. und aktual. Aufl.. München: Oldenbourg, 2003

- [LAN05] Lanza, G.: Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen. Karlsruhe, 2005 (Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe (TH) 127). Karlsruhe, Univ., Fak. für Maschinenbau, Institut für Produktionstechnik, Diss. 2004
- [LOR97] Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen. Berlin u.a.: Springer, 1997 (iwb Forschungsberichte; 107). Zugl. München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1996
- [LUE98] Lücke, O: Methodische Nutzung der betrieblichen Lernfähigkeit. Ein Beitrag zum verbesserungsorientierten Auftragsmanagement in der Kleinserienfertigung komplexer Produkte. Essen: Vulkan Verlag, 1999. Zugl. Braunschweig, Techn. Univ., Diss. 1998
- [LUC99] Luczak, H: Arbeitsgestaltung, Arbeitsorganisation, Arbeitspersonen. In: Eversheim, Walter (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.); Akademischer Verein Hütte: Produktion und Management / CD-ROM. 7., völlig Neubearb. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 1999, S. 12-39 -12-74
- [MAT05] Mateika, M.: Unterstützung der lebenszyklusorientierten Produktplanung am Beispiel des Maschinen- und Anlagenbaus. Essen : Vulkan-Verlag, 2005. Zugl. Braunschweig, Techn. Univ. , Diss, 2005
- [MIC04] Michel, R., Torspecken, H.-D., Jandt, J.: Neuere Formen der Kostenrechnung mit Prozesskostenrechnung : Kostenrechnung 2., 5., überarb. und erw. Aufl. München; Wien: Hanser, 2004 (Studienbücher der Wirtschaft)
- [MUE01] Müller, P.; Krämer, K.; REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung: BDE mDE Ident Report 2001: Das Handbuch zur Datenerfassung mit Marktübersicht, Anwenderberichten, Anbieterverzeichnis und Auswahlsoftware; Betriebsdatenerfassung, mobile Datenerfassung, Ident-Techniken (Auto-ID). Darmstadt, 2001 (Edition FB/IE)
- [MUS03] Mußbach-Winter, U.; Wiendahl, H.-H.; Treutlein, P.: Was leisten MES-Systeme? In: Computer & Automation (2003), Nr. 8, S. 20-24
- [MTM01a] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.: Das ganzheitliche Produktionssystem-Expertenwissen für neue Konzepte. Management Leitfaden. Hamburg, 2001
- [MTM01b] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.: Das ganzheitliche Produktionssystem: Expertenwissen für neue Konzepte. GPS Anwenderhandbuch, Hamburg, 2001

- [NEU05] Neumann, S.; Wiechel, W. D.: Einführung von Workflowmanagement bei der Hotset Heizpatronen und Zubehör GmbH. In: Becker, J. (Hrsg.), Kugeler, M. (Hrsg.), Rosemann, M. (Hrsg.): Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 5., überarb. und erw. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer, 2005, S. 539-554
- [NIE03] Niemann, J.; Westkämper, E.: Lebenslaufumfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von verteilt erbrachten elektronischen Dienstleistungen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 98 (2003), Nr. 1-2, S. 50-53
- [NIE03a] Niemann, J.: Ökonomische Bewertung von Produktlebensläufen- Life Cycle Controlling. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg.) u.a.: Neue Organisationsformen im Unternehmen : Ein Handbuch für das moderne Management. Berlin u.a. : Springer, 2003, S. 904-916
- [NIE05] Niemann, J.; Österle, M.; Westkämper, E.: Erfahrungskurvenbasierte Investitionsplanung : Integration industrieller Lerneffekte in die Kostenplanung. In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 7/8, S. 564-568
- [NIE05a] Niemann, J.; Westkämper, E.: Dynamic Life Cycle Control of Integrated Manufacturing Systems using Planning Processes Based on Experience Curves. In: Weingärtner, Lindolfo (Chairman) u.a.; CIRP: 38th International Seminar on Manufacturing Systems / CD-ROM : Proceedings, May 16/18 - 2005, Florianopolis, Brazil. 2005, 4 p
- [NIK01] Niestadtkötter, J.: Methodik zur ganzheitlichen Dokumenten- und Datenstrukturierung im Lebenslauf komplexer Werkzeugmaschinen. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2001 (IPA-IAO Forschung und Praxis 332). Zugl. Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2000
- [OSE06] o.V: UML Notationsübersicht. Online in Internet: PURL <http://www.oose.de/uml>, URL: <http://www.oose.de/downloads/uml-2-Notationsuebersicht-oose.de.pdf>, Version 2.0, oose.de GmbH, 2006
- [OST99] Osten-Sacken, D. von der: Lebenslauforientierte, ganzheitliche Erfolgsrechnung für Werkzeugmaschinen. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 1999 (IPA-IAO Forschung und Praxis 299). Zugl. Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1999

- [PER04] Perridon, L.; Steiner, M.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. 13., überarb. und erw. Aufl.. München: Vahlen, 2004 (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [PFL93] Pflieger, H.; Reichle, W.; Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau/Abteilung Betriebswirtschaft: Das Rechnen mit Maschinenstundensätzen. 7., überarb. Aufl.. Frankfurt/Main: Maschinenbau Verlag, 1993
- [PLI00] Plinke, W.; Rese, M. (Red.): Industrielle Kostenrechnung: Eine Einführung. 5. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer, 2000 (Springer Lehrbuch)
- [REF78] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen. München: Hanser, 1978
- [REF87] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Hanser, 1987
- [REH99] Reinhard, G. u.a.: Reaktionsfähigkeit für Unternehmen: eine Antwort für turbulente Märkte. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr. 1-2, S. 21-24
- [REH04] Reinhard, G.: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Fabriken im globalen Wettbewerb. Hochlauf von Fabriken und Produktionssystemen. In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA u.a.: Fabrikplanung : 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Stuttgart, 31. März und 01. April 2004. Landsberg/Lech : verlag moderne industrie, 2004, o.Z
- [ROS00] Rosemann, M., Becker, J.: Informationsmanagement. In: Schneider, H. (Hrsg.): Produktionsmanagement in kleinen und mittleren Unternehmen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2000
- [SCH00] Schlüter, F., Schneider, H.: Produktionsplanung und –steuerung. In: Schneider, H. (Hrsg.): Produktionsmanagement in kleinen und mittleren Unternehmen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2000
- [SCW03] Schweitzer, M.; Küpper, H.-U.: Systeme der Kosten- und Erlösrechnung. 8., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, 2003 (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [SHI92a] Shirose, K.: TPM for Workshop Leaders. Cambridge: Productivity Press, 1992
- [SHI92b] Shirose, K.: TPM for Operators. Cambridge: Productivity Press, 1992

- [SMT02] Schmidt, K.: Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen. Aachen: Shaker Verlag, 2002. Zugl. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002
- [SPA03] Spath, D. (Hrsg.): Ganzheitlich produzieren. Innovative Organisation und Führung. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH, 2003
- [SPA06] Spath, D.: F&E Konzepte für die Zukunft –Management von Technologie und Engineering. In: Geißinger, J.: Forschung stärken - Produktion sichern. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Engelbert Westkämper. Berlin u.a., Springer, 2006
- [STA04] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2004 für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden, 2004
- [STE03] Steinle, Claus (Hrsg.); Bruch, Heike (Hrsg.): Controlling: Kompendium für Ausbildung und Praxis. 3., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2003
- [STO03] Stolz, M.: Neue Produktnutzungskonzepte und Tele-Technologien. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.); Warnecke, H. J. (Hrsg.); Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management. 2., neubearb. u. erw. Aufl.. Berlin u.a.: Springer, 2003, S. 861-874
- [THO03] Thome, R.: ERP - Eine Grundlage für die Zukunftssicherung von Unternehmen: VDi-KfIT Fachtagung, 18. Februar 2003, Würzburg, 2003
- [TIC01] Tichkiewitch, S.; Brissaud, D.: Product models for life-cycle. In: CIRP Annals Manufacturing Technology Vol. 50 (2001) 1, S. 105-108
- [TÖN04] Tönshoff, H. K. u.a.: Werkzeuge und Dienstleistungen - Eine Kombination mit Zukunft. In: Wt werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 11/1, S. 638-643
- [VDI2884] Richtlinie VDI 2884 2005-12: VDI Richtlinien: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC).
- [VDI3423] Richtlinie VDI 3423 2002-12: VDI Richtlinien: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen: Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung.
- [VDI3633-1] Richtlinie VDI 3633 Blatt 1 (Entwurf) 2000-03: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen

- [VDI3633-6] Richtlinie VDI 3633 Blatt 6 : Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in den Simulationsmodellen
- [VDI3633-7] Richtlinie VDI 3633 Blatt 7: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Kostensimulation
- [VDMA34160] VDMA Einheitsblatt 34160: 2006-02 (Entwurf): Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen
- [WAR93] Warnecke, H.-J.: The Fractal Company - A Revolution in Corporate Culture. Berlin u.a.: Springer, 1993
- [WAR96] Warnecke, H.-J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegelé, A.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure . 3., überarb. Aufl.. München u.a.: Hanser, 1996 (Hanser Studienbücher)
- [WER01] Werner, M.: Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen. München: Utz, 2001 (iwb Forschungsberichte 157). Zugl., München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 2001
- [WES97] Westkämper, E.: Lernfähige Produktion. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik u.a.: Stuttgarter Impulse: Innovation durch Technik und Organisation: Fertigungstechnisches Kolloquium am 11.und 12. November 1997, Stuttgart. Berlin u.a. : Springer, 1997, S. 226-243
- [WES00a] Westkämper, E.: Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung. In: Werkstattstechnik online 90 (2000), Nr. 3, S. 92-95
- [WES00b] Westkämper, E.: Modellierung und Steuerung von Prozeßketten in segmentierten Unternehmen mittels lernender Strukturen. In: Technische Universität <Hannover> / Institut für Fabrikanlagen u.a.: Modellierung der Produktion : Laufzeit 1994-1997. Hannover, 2000, Getr. Z.
- [WES03] Westkämper, E.: Wandlungsfähige Organisation und Fertigung in dynamischen Umfeldern, in: Bullinger, H.-J., Warnecke, H. J., Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management, 2. neu bearb. und erw. Auflage, Berlin u.a.: Springer Verlag 2003

- [WES04a] Westkämper, Engelbert: Fabrikplanung und -konfiguration mit Werkzeugen der digitalen Fabrik. In: Zäh, Michael Friedrich (Hrsg.) u.a.; Technische Universität <München>/Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften: Virtuelle Produktionssystemplanung: Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. Seminar, Garching, 23. September 2004. München: Utz, 2004, getr. Z. (Seminarberichte iwB 74).
- [WES04b] Westkämper, E. (Leitung); Drexler, K. (Red.); Moisan, A. (Red.); CIRP: Wörterbuch der Fertigungstechnik-Band 3: Produktionssysteme. 1. Aufl.. Berlin u.a.: Springer, 2004
- [WES04c] Westkämper, E., Stolz, M.: Sprachportale als Baustein des Teleservice. In: Wt werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 7/8, S. 322-325
- [WES04d] Westkämper, E.; Dunker, T. (Mitarb.); Universität <Stuttgart>/Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF); Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Sonderforschungsbereich 467: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen. Lampertheim: Alpha Informations GmbH, 2004
- [WES04e] Westkämper, E.: Das Stuttgarter Unternehmensmodell: Ansatzpunkte für eine Neuorientierung des Industrial Engineering. In: REFA Landesverband Baden-Württemberg: Ratiodesign: Wertschöpfung - gestalten, planen und steuern. Bodensee-Forum. 17. und 18. Juni 2004, Friedrichshafen. Mannheim, 2004, S. 6-18
- [WES06] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Strategien der Produktion. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006
- [WIE99] Wiendahl, H.-P.: Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, Walter (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.); Akademischer Verein Hütte: Produktion und Management / CD-ROM. 7., völlig Neubearb. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 1999, S. 14-1 – 14-130
- [WIE04] Wiendahl, H.-H.: Erfolgreicher produzieren mit Manufacturing Execution Systems : Ausgestaltung, Nutzen, Stolpersteine. In: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: MES - Manufacturing Execution Systems : VDMA-Informatiktagung, 9. Dezember 2004, Frankfurt am Main. Frankfurt/Main, 2004, o.Z.

- [WIE05] Wiendahl, H.-H.; Mußbach-Winter, U.; Kipp, R.: MES-Lösungen: Wann braucht man sie, wozu sind sie nützlich? In: IT & Production 5 (2005), Nr. 3, S. 18-19
- [WIL98] Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5. überarb. und erg. Aufl.. München: TCW Transfer-Centrum, 1998 (TCW 2)
- [WIL03] Wildemann, H.: Supply Chain Management: Effizienzsteigerung in der unternehmensübergreifenden Wertschöpfungskette. München: TCW Transfer-Centrum, 2003 (TCW-Report 39)
- [WIL04] Wildemann, H.: Produktionssysteme: Leitfaden zur methodengestützten Reorganisation der Produktion. 2. Aufl.. München: TCW Transfer-Centrum, 2004 (TCW-Leitfaden)
- [WIN02] Winnes, R.: Die Einführung industrieller Produktionssysteme als Herausforderung für Organisation und Führung. Karlsruhe, Univ., 2002
- [WÖH02] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21., neubearb. Auflage, München: Vahlen, 2002 (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [ZMÜ05] Zur Mühlen, M.; Hansmann, H.: Workflowmanagement. In: Becker, J. (Hrsg.), Kugeler, M. (Hrsg.), Rosemann, M. (Hrsg.): Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 5., erw. Aufl.. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005.
- [ZWA03] Zwahr, A.: Meyers großes Handlexikon: A – Z. 22., überarb. und aktual. Aufl.. Mannheim u.a.: Meyers Lexikonverlag, 2003