Universität Stuttgart
IPVR

Studiengang: Informatik

Prüfer: Prof. Mitschang

Betreuer: Uwe Heinkel

Beginn: 1. März 2001

Ende: 31. August 2001

CR-Klassifikation: G.1.6, H.3.4, I.2.8, J.1

Diplomarbeit Nr. 1928

Konzeption eines ganzheitlichen Produktionsoptimierers

Sven Hanssen

Institut für Parallele und Verteilte Höchstleistungsrechner (IPVR)
Universität Stuttgart
Breitwiesenstraße 20-22
D-70565 Stuttgart

Inhalt

Inhaltsverzeichnis ..... *I*

1. Einführung *1*
1.1 Problematik und Zielsetzung 1
1.2 Die weitere Gliederung der Arbeit 3

2. Grundlagen *5*
2.1 Begriffsdefinitionen 5
2.1.1 Industriebetrieb 5
2.1.2 Produktionssystem 5
2.1.3 Outputfaktoren 6
2.1.4 Inputfaktoren 7
2.1.5 Produktionsprozeß 9
2.1.6 Fertigungsauftrag und Arbeitsschritt 9
2.1.7 Arbeitssystem und Produktiveinheit 11
2.1.8 PPS (Produktionsplanung und -steuerung) 12
2.1.9 ERP (Enterprise Resource Planing) -Systeme 13
2.2 Das Teilprojekt B2: Dynamische Fabrikstrukturen 13
2.3 Das Teilprojekt C1: Kooperative Planung und Steuerung in dynamischen Prozeßketten 15
2.4 Verwandte Forschungen 16
2.4.1 Das Virtuelle Produktionsoptimierungssystem von Heinkel 16
2.4.2 Der Forschungsansatz des Teilprojekts A1 17
2.4.3 Integrierte Ansätze nach Corsten 19

3. Konzeption *21*
3.1 Ein Beispielszenario 21
3.2 Die Grundideen des Produktionsoptimierers 22
3.3 Datenmodellierung 25
3.3.1 Die Klasse Arbeitssystem 26
3.3.2 Die Klasse Produktionsstätte 27
3.3.3 Die Klasse Produkt 28
3.3.4 Die Klasse Schicht 28
3.3.5 Die Klasse Fertigungsauftrag 30
3.3.6 Die Klasse Arbeitsschritt 30
3.3.7 Weitere Klassen 31
3.3.8 Abgeleitete Daten 33

4. Der Produktionsoptimierungsprozeß *34*
4.1 Grundsätzlicher Ablauf und Vorphase 34
4.2 Optimierungsphase 36
4.2.1 Definition des Zustandsraums 37
4.2.2 Spezifikation des Ausgangszustands 39
4.2.3 Spezifikation der Zielzustände 39
4.2.4 Festlegen der Navigationsmöglichkeiten 39
4.3 Optimierungsstrategie 40
4.4 Ablauf der Optimierungsphase 43

4.5 Kennzahlen ... 45
4.5.1 Kennzahlen einzelner Arbeitsschritte ... 46
4.5.2 Kennzahlen einzelner Fertigungsaufträge ... 47
4.5.3 Kennzahlen einzelner Arbeitssysteme ... 49
4.5.4 Kennzahlen der Produktionsstätte ... 50
4.5.5 Kennzahlen der gesamten Fertigung ... 51
4.5.6 Weitere Kennzahlen ... 52
4.5.7 Zusammenfassung: Klassendiagramme ... 52
4.6 Optimierung nach mehrfachen Kriterien (Multicriteria Optimization) ... 54
Exkurs: Theorie der Optimierung nach mehrfachen Entscheidungskriterien ... 57
4.7 Die Variation der Auftragsterminierung ... 64
Exkurs: Netzplantechnik ... 66
4.7.1 Auswahl des Fertigungsauftrags mit der relevantesten Terminabweichung ... 68
4.7.2 Ermittlung des Arbeitsschritts mit dem höchsten Terminverzug ... 68
4.7.3 Ermittlung der verfügbaren Pufferzeiten ... 69
4.7.4 Ermittlung der freien Kapazitäten und Verschieben des Arbeitsschritts ... 71
4.7.5 Vorziehen eines Arbeitsschritts und Auswirkungen auf die Fertigung ... 71
4.7.6 Konzeption des Auftragsterminierungsmoduls ... 74

5. Integration ... 76
5.1 Modularer Aufbau des Produktionsoptimierungssystems ... 76
5.2 Datenintegration ... 78
5.3 Datenaustausch zwischen den Teilsystemen ... 82
5.4 Integration unter Verwendung eines ERP-Systems am Beispiel SAP R/3 ... 84
5.5 Ansätze zur Flexibilität des Produktionsoptimierungssystems selbst ... 86

6. Anwendung ... 88
6.1 Überblick ... 88
6.2 Produktionsplanung ... 88
6.2.1 Neugestaltung einer Produktionsstätte ... 88
6.2.2 Fortlaufende Produktionsplanung ... 90
6.3 Business Process Reengineering ... 90
6.4 Auftragsannahme ... 92
6.5 Investitionsbeurteilung ... 94

7. Evaluation ... 96
7.1 Hintergrund und Zielsetzung ... 96
7.2 Die MTU Friedrichshafen als Untersuchungsgegenstand ... 96
7.3 Aufbau der Fallstudie ... 97
7.4 Teil 1 der Fallstudie: Vorstellung der Ansätze, Bewertung ... 97
7.4.1 Wandlungsfähigkeit und Flexibilität ... 97
7.4.2 Fabriklayoutplanung und dynamische Fabrikstrukturen ... 98
7.4.3 PPS- und CIM-Systeme, Simulationswerkzeuge ... 98
7.5 Teil 2 der Fallstudie: Angewandte Methoden in der MTU ... 99
7.5.1 Organisatorische Maßnahmen zur Schaffung von Flexibilität ... 99
7.5.2 Fabriklayoutplanung und dynamische Fabrikstrukturen ... 100
7.5.3 PPS und CIM ... 100

7.6 Teil 3 der Fallstudie: Möglichkeiten und Voraussetzungen für den Einsatz des Produktionsoptimierungssystems ... 101

7.6.1 Einführung des Produktionsoptimierungssystems 101
7.6.2 Anwendungsmöglichkeiten 102
7.7 Fazit der Fallstudie 102

8. Schlußbetrachtung 104
8.1 Zusammenfassung 104
8.2 Schlußbewertung des Produktionsoptimierungssystems 104
8.3 Durchführung der Arbeit 105

Literaturverzeichnis IV

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis X

1. Einführung

1.1 Problematik und Zielsetzung

Im Zuge des **technischen Wandels** sehen sich viele Unternehmen vor die Schwierigkeit gestellt, mit der fortschreitenden Entwicklung neuer Anwendungen und Produkte Schritt zu halten. Die dazu notwendigen, stetig steigenden Forschungsaufwendungen und Kapitalinvestitionen müssen durch immer größere Produktions- und Absatzmengen gedeckt werden, um von Kostendegressions-effekten profitieren zu können. Aufgrund dieses Trends, der sich in zahlreichen Branchen vollzieht, können die hohen Forschungs- und Entwicklungskosten bei gegebenen kurzen Produktlebenszyklen nur durch eine global ausgerichtete Vermarktungsstrategie der Produkte und Dienstleitungen getragen werden. Als Konsequenz dieser Entwicklung werden Unternehmen nur dann langfristig auf dem Weltmarkt bestehen können, falls sie in der Lage sind, rasch auf Veränderungen der Umwelt reagieren zu können und gleichzeitig größtmögliche Skaleneffekte zu erzielen[1].

Zur Erreichung des o.g. **Flexibilitätsziels** in einem **produzierenden Betrieb** sind die Auswirkungen der Veränderung der Umgebung des Unternehmens auf den Produktionsbereich zu analysieren. In Tabelle 1 sind beispielhaft Veränderungen des Umsystems Absatzmarkt in ihrer Wirkung auf die Produktion aufgeführt.

Veränderungen auf dem Absatzmarkt	Produktionswirtschaftliche Auswirkungen (Beispiele)
Kürzer werdende Produktlebenszyklen	- häufiger Produktwechsel - Weniger Zeit für die Produktentwicklung - Weniger Zeit für die Produktionsoptimierung
Nachfragedifferenzierung (mit dem Wunsch nach größerer Typen- und Variantenvielfalt)	- Häufigere Rüstvorgänge - Höherer Planungs- und Steuerungsaufwand - Höherer Entwicklungsaufwand
Zunehmender internationaler Wettbewerb	- wachsender Preisdruck und damit Druck auf die Produktionskosten - Schnellere Umsetzung des technischen Fortschritts
Verändertes Kundenverhalten (bzgl. Leistungsmerkmalen, Qualitätsniveau, Lieferzeiten etc.)	- Nachfrage nach individualisierten, maßgeschneiderten Lösungen - Höheres Qualitätsbewußtsein

Tabelle 1: Produktionswirtschaftliche Auswirkungen von Veränderungen auf dem Absatzmarkt (Quelle: Corsten (1992), S. 4)

Flexibilität bezogen auf die Produktion ist ein Maß für die Fähigkeit zur Anpassung und Umstellung an wechselnde Aufgaben. Sie gibt an, ob, in welchem Umfang und

[1] Vgl. Macharzina (1999), S. 145f.

wie schnell die Leistung eines Produktionssystems an andersartige Produktionsaufgaben angepaßt werden kann[2]. Neuere Forschungsarbeiten weisen in diesem Zusammenhang auf eine **Schwachstelle** des geforderten Flexibilitätskriteriums hin: So bedingt Flexibilität eines Eingriffs von außen in das System, falls Umweltänderungen auftreten, die während der Spezifikation des Systems noch nicht bekannt waren. Solche Eingriffe sind jedoch zeitaufwendig[3]. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 467 (Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienfertigung) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, der Begriff der **Wandlungsfähigkeit** eingeführt:

„*Ein System wird als wandlungsfähig bezeichnet, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozeß- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt. Wandlungsfähige Systeme sind in der Lage, neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen. Diese Aktivitäten können auf Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hinwirken*“[4].

Innerhalb des Sonderforschungsbereichs 467 werden verschiedene Konzepte zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit für ein Unternehmen des produzierenden Gewerbes untersucht, u.a. die Verwendung **dynamischer Fabrikstrukturen** - Produktionsmittel (z.B. Maschinen) sind nicht an einen festen Aufstellungsort gebunden, sondern können je nach Bedarf flexibel versetzt werden - sowie die **Simulation von Produktionsabläufen** zur Generierung charakteristischer Kennzahlen des Produktionsbetriebes, aus welchen etwa die Bestimmung von Engpässen und Unterauslastungen möglich ist. Neben diesen relativ neuen Forschungsrichtungen finden sich in der Literatur verschiedene „klassische“ Ansätze zur Gestaltung anpassungsfähiger Produktionsprozeßabläufe. Dieses Instrumentarium umfaßt u.a. Methoden der **Layoutplanung** (die optimale Anordnung von Objekten zueinander[5], gleichsam die theoretische Grundlage bei der Verwendung der oben aufgeführten dynamischen Fabrikstrukturen), der **Terminplanung** (zeitliche Zuordnung von Aufträgen auf die entsprechenden Produktiveinheiten) und der **Reihenfolgeplanung** (Festlegung der Reihenfolge, in welcher eine Menge von Aufträgen auf den zum Einsatz gebrachten Produktionsmitteln zu bearbeiten ist)[6].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die aufgezählten innovativen Einzelkonzepte der dynamischen Fabrikstrukturen und der Simulation von Produktionsabläufen mit den klassischen Ansätzen der Produktionsprozeßgestaltung zu verbinden und in ein **zusammenhängendes System** zu integrieren. Dazu werden Daten hinsichtlich des Bestands an **Produktionsmitteln** sowie der **Produktionsplanung** zusammengefaßt und in einem Optimierungsschritt an **Teilsysteme** verschickt, deren Zwischenresultate mit Hilfe des Simulationsmoduls ausgewertet werden. Da die Ergebnisse der Teilsysteme aufeinander aufbauen können, wird dieser Vorgang solange wiederholt, bis eine „optimale“ Planung des Produktionsablaufs (im Hinblick auf noch zu definierende Kenngrößen wie z.B. Termineinhaltung, Auslastungsgrad etc.) bestimmt wurde. Das Ergebnis dieses **Optimierungsprozesses** ist dann eine

[2] Vgl. Corsten (1992), S. 19
[3] Vgl. Westkämper/Zahn/Balve/Tilebein (1999), S. 4
[4] Westkämper/Zahn/Balve/Tilebein (1999), S. 4
[5] Vgl. Corsten (1992), S. 387ff.
[6] Vgl. Corsten (1992), S. 400ff.

angepaßte zeitliche Planung der Fertigungsaufträge sowie diesbezüglich optimale Anordnung der Produktionsmittel.

Der Produktionsoptimierungsprozeß soll zu Beginn jeder Planungsperiode einmalig ausgeführt werden, um so den voraussichtlichen Produktionsablauf, wie er sich zum Planungszeitpunkt darstellt, zu bestimmen. Bei jeder Änderung des Auftragsbestandes (Auftragsannahme, Änderung oder Wegfall eines Auftrags) wird der Optimierungsprozeß erneut durchgeführt. Auf diese Weise sollen Fragestellungen wie - Kann ein neuer Fertigungsauftrag im Rahmen der vorhandenen Kapazitäten eingeplant werden? Welche Auswirkungen bezüglich Termintreue etc. ergeben sich für die vorhandenen Aufträge? Ist der Ausbau weiterer Produktionskapazitäten vor diesem Hintergrund wirtschaftlich? - beantwortet werden können.

1.2 Die weitere Gliederung der Arbeit

Zur Erreichung der oben gesetzten Zielsetzung werden in dieser Arbeit die folgenden Teilaufgaben bearbeitet:

Zunächst ist eine allgemeine Einführung in die Thematik der Produktionswirtschaft geboten, womit sich **Kapitel 2** beschäftigen wird. Es sollen die inhaltlichen **Grundlagen** für die folgenden Kapitel gelegt werden. Speziell werden die wichtigsten **Begriffe**, wie sie im folgenden im Rahmen der Arbeit verwendet werden, eingeführt und erklärt. Daneben erfolgt eine kurze Einführung in die bereits skizzierte generelle Vorgehensweise der **Teilsysteme** dynamische Fabrikstrukturen und Fertigungsauftragssimulation, auf deren Ergebnissen der Produktionsoptimierungsprozeß aufbauen wird. Des weiteren soll ein kurzer Einblick in **verwandte Forschungsarbeiten** gegeben werden.

In **Kapitel 3** erfolgt die grundsätzliche **Konzeption** des Produktionsoptimierungssystems, wie es sich aus der Zielsetzung der Arbeit definiert. Es wird ein Einblick in den **Hintergrund** gegeben, welcher zur Entstehung des Produktionsoptimierungssystems in der vorliegenden Form geführt hat. Nach Analyse des Problemfeldes erfolgt die Erfassung der relevanten Daten und daraus die **Modellierung einer Klassenstruktur**, mit der im folgenden gearbeitet wird.

Kapitel 4 beschreibt den **Prozeß der Produktionsoptimierung** aus algorithmischer Sicht. Speziell wird die Entwicklung der gewählten **Optimierungsstrategie** einschließlich der zugrundeliegenden Überlegungen aufgezeigt. Im Anschluß daran erfolgt die Entwicklung eines **Kennzahlensystems** zur Beschreibung der Qualität von Produktionsabläufen. Da die Fragestellung, wann ein Produktionsablauf als optimal einzustufen ist, von nicht-trivialer Natur ist, muß die Frage der grundsätzlichen Bewertung von Produktionsabläufen geklärt werden. Hierzu erfolgt eine Einführung in die Theorie der Optimierung unter Beachtung mehrfacher Kriterien sowie die Auswahl einer Bewertungsmethode für den vorliegenden Anwendungsfall. Schließlich erfolgt noch die algorithmische Konzeption des Teilsystems zur zeitlichen Planung der Fertigungsabläufe (Auftragsterminierung).

Im **Kapitel 5** wird die Konzeption des gesamten Produktionsoptimierungssystems beschrieben. Es werden Fragen der Schnittstellenbehandlung und des

Datenaustauschs zwischen den Teilsystemen behandelt sowie ein grundsätzlicher Aufbau für das System entwickelt.

Kapitel 6 befaßt sich mit den **Anwendungsmöglichkeiten** des Produktionsoptimierungssystems. Speziell erfolgt vor dem Hintergrund der in der Zielsetzung aufgeführten Fragestellungen eine Beurteilung dahingegehend, auf welche Weise das Produktionsoptimierungssystem zum Finden von Lösungen beitragen kann, welche Rahmenbedingungen gegeben sein müssen, wie sich die Anwendung gestaltet etc.

In **Kapitel 7** erfolgt eine **Bewertung** des Produktionsoptimierungssystem **aus praktischer Sicht**. Mit Hilfe eines für die Produktionsgestaltung innerhalb eines existierenden Unternehmens verantwortlichen Spezialisten sollen die Ansätze des Produktionsoptimierungssystems auf ihre Einsatzmöglichkeiten und Grenzen in einem konkreten Fall hin untersucht werden. Ferner sollen **Voraussetzungen** abgeleitet werden, welche für einen erfolgreichen Einsatz des Produktionsoptimierungssystems vorhanden sein müssen. Die praktische Untersuchung erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Sie hat vielmehr den Charakter einer **Fallstudie**, da nur genau ein Industriebetrieb untersucht wurde (wobei die Betonung auf einer möglichst tiefgehenden Betrachtung lag). Die Ergebnisse der praktischen Untersuchung dürfen also nicht als empirischer Befund aufgefaßt werden.

Im **Schlußkapitel 8** wird schließlich neben einer **zusammenfassenden Betrachtung** ein abschließendes **Fazit** über die gesamte Arbeit gezogen.

2. Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Begriffe, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, eingeführt. Auf diese Weise soll eine Basis gleichen Verständnisses für die weiteren Ausführungen geschaffen werden, indem dargelegt wird, in welcher Weise die in der Literatur z.T. synonym für verschiedene Sachverhalte gebrauchten Termini in dieser Arbeit aufgefaßt werden. So findet sich in der Literatur beispielsweise für den Begriff der **Produktiveinheit**, worunter Fertigungseinrichtungen (~ Maschinen) aller Art verstanden werden[7], z.T. synonym, z.T. mit leichter inhaltlicher Abgrenzung, die Bezeichnung **Betriebsmittel**[8], **Arbeitssystem**[9] und **Ressource**[10]. Im Zuge einer einheitlichen Begriffsverwendung wird sich diese Arbeit auf jeweils *einen* Ausdruck inklusive seiner Bedeutung für die weitere Verwendung festlegen.

2.1.1 Industriebetrieb

Wie bereits im einleitenden Kapitel 1 ausgeführt, erstrecken sich die Betrachtungen dieser Arbeit auf die **industrielle Produktion**, wie sie in **Industriebetrieben** vorherrscht. In historischer Perspektive bildeten sich unterschiedliche Formen des industriellen Betriebs heraus, nämlich das Handwerk, die Verlage, die Manufakturen und die Fabriken[11]. Die **Fabrik** ist die heute vorherrschende industrielle Betriebsform, im täglichen Sprachgebrauch impliziert sie den Industriebetrieb schlechthin. Kennzeichnend ist ein hoher Grad an **Mechanisierung**, eine hohe **Arbeitsteilung** sowie eine **marktorientierte** Produktion von **materiellen** Sachgütern in großen zentralisierten Werkstätten[12].

Zur **Industrie** zählt nahezu das gesamte **produzierende Gewerbe**, im einzelnen die Hauptgruppen **Energie**- und **Wasserversorgung**, **Bergbau**, **verarbeitendes Gewerbe** und Teile des **Baugewerbes** (Hoch- und Tiefbau). Das verarbeitende Gewerbe läßt sich weiter untergliedern in das Grundstoff- und Produktionsgütergewerbe, das Investitionsgüter produzierende Gewerbe, das Verbrauchsgüter produzierende Gewerbe sowie das Nahrungs- und Genußmittelgewerbe[13].

2.1.2 Produktionssystem

Das **Produktionssystem** als Subsystem des übergeordneten Systems Unternehmung ist der Ort, in welchem sich die „*auf Wiederholung angelegte, systematische Bildung von Faktorkombinationen im Sinne einer Anwendung von technischen oder konzeptionellen Verfahren, welche für die Erfüllung des*

[7] Vgl. Corsten (1992), S. 416
[8] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 117
[9] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 112
[10] Vgl. Westkämper (1999) durchgängig
[11] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 48
[12] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 50
[13] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 53

Systemzwecks (Sachziel) nötig sind und die beabsichtigte nutzensteigernde Veränderung derjenigen materiellen und/oder immateriellen Güter ermöglichen, welche die materielle oder immaterielle Hauptleistung des Systems ... darstellen“[14], vollzieht. Abbildung 1 zeigt das Produktionssystem in seiner Stellung als Subsystem der Unternehmung.

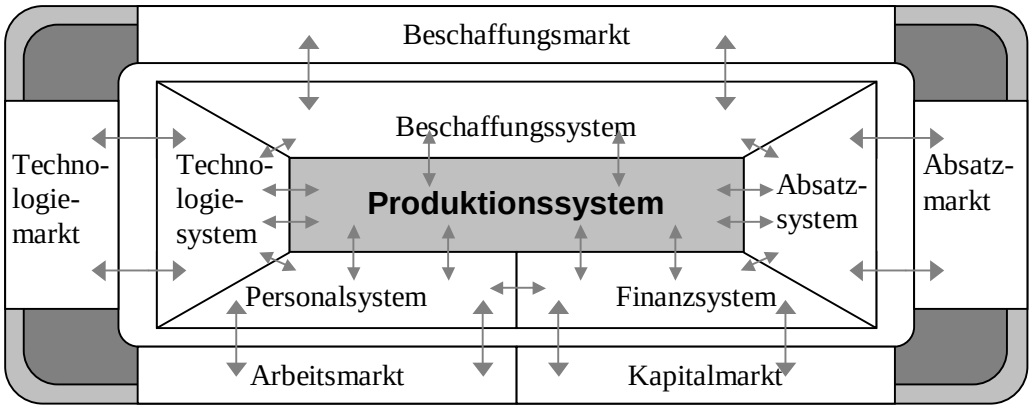

Abb. 1: Das Produktionssystem als Subsystem der Unternehmung (In Anlehnung an Corsten (1992), S. 3)

Es ist dabei kein isoliertes Subsystem, sondern steht mit den anderen Subsystemen der Unternehmung direkt sowie seiner relevanten Umwelt indirekt, d.h. über die anderen Subsysteme, in Austauschbeziehung. So ist es Aufgabe der Beschaffung, die zur Produktion erforderlichen Produktionsfaktoren in der richtigen Menge und Qualität zu geringen Kosten zu „beschaffen“, wofür das Finanzsystem die erforderlichen Finanzmittel zur Verfügung zu stellen hat. Die von der Produktion erstellten Güter werden über das Absatzsystem am Absatzmarkt veräußert, wodurch dem Finanzsystem wieder Finanzmittel zufließen. Die Subsysteme Technologie und Arbeitsmarkt haben die Aufgabe, der Produktion die notwendigen Produktionstechnologien bzw. Mitarbeiter bereitzustellen[15].

Das Produktionssystem unterhält keine direkten Austauschbeziehungen mit der Umwelt des Unternehmens, d.h. Veränderungen werden nur indirekt über die anderen Subsysteme wahrgenommen[16] (Vgl. Abbildung 1). Die flexible bzw. wandlungsfähige Gestaltung des Produktionssystems muß dies in Betracht ziehen.

2.1.3 Outputfaktoren (=Produkte, Ausbringung, Erzeugnisse)

Hierunter werden grundsätzlich die von Unternehmen produzierten Güter verstanden[17]. Genauer: „*Jedes Ergebnis der Kombination von Einsatzgütern im Rahmen industrieller Produktionsprozesse verkörpert den Output industrieller Produktionssysteme. Die einzelnen* ***Outputfaktoren*** *werden synonym als* ***Produkte, Erzeugnisse, Produktionsleistung, Ausbringungsleistung*** *oder* ***Produktions-ergebnis*** *bezeichnet*“[18].

[14] Corsten (1992), S. 1
[15] Vgl. ebenda, S. 2f
[16] Vgl. ebenda, S. 4
[17] Vgl. Wöhe (1993), S. 555
[18] Zahn/Schmid (1996), S. 113

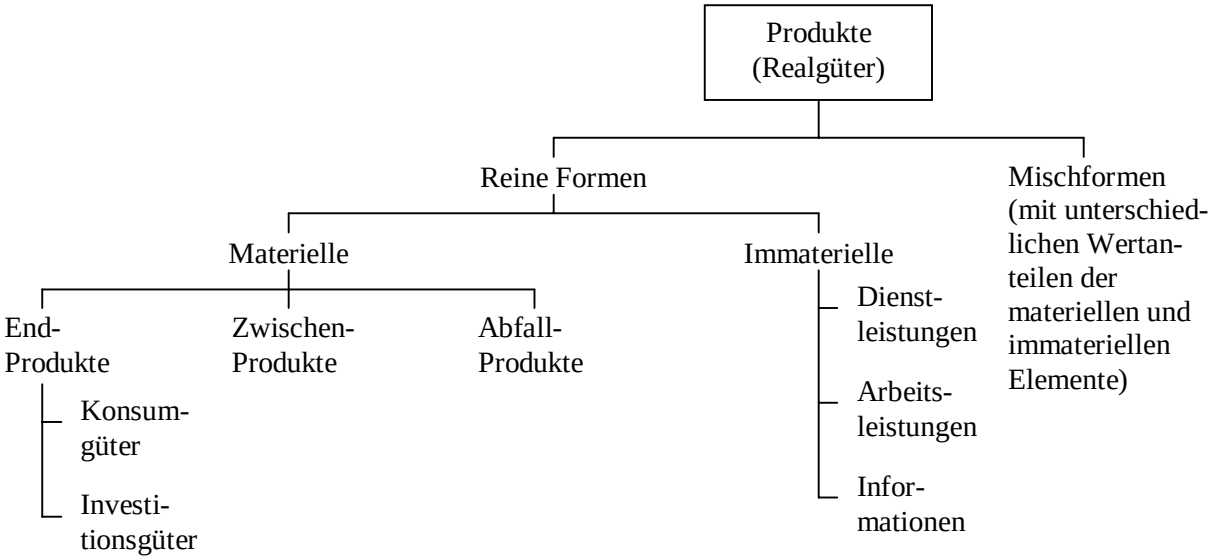

Abb. 2: Systematisierung der Produkte (Quelle: Corsten (1992), S. 13)

Aus absatzwirtschaftlicher Sicht können Produkte als das Ausbringungsgut gekennzeichnet werden, das zur Bedürfnisbefriedigung Dritter geeignet ist. Sie können sowohl materieller als auch immaterieller Natur sein. Schließlich lassen sich Produkte in Endprodukte, Zwischenprodukte und Abfallprodukte unterscheiden, wobei Endprodukte wiederum in Konsum- und Investitionsgüter untergliedert werden können[19]. Abbildung 2 zeigt die Systematisierung von Produkten auf.

2.1.4 Inputfaktoren (=Produktionsfaktoren, Faktoreinsatz)

Inputfaktoren sind generell die zur Produktion eingesetzten Güter[20]. Zahn/Schmid führen genauer aus: „***Inputfaktoren*** *verkörpern das qualitative und quantitative Potential zur industriellen Leistungserstellung*“[21]. „*Im Hinblick darauf, daß Einsatzgüter jeweils in ihrer Gesamtheit eine Produktion bewerkstelligen (facere: lat. = machen) können, werden sie in den Wirtschaftswissenschaften global als* ***Produktionsfaktoren*** *(produktive Faktoren, Produktoren) bezeichnet*“[22]. „*Deren Art und Menge wird durch die Entscheidung darüber determiniert, welche Zweckprodukte in Produktions-systemen hergestellt werden sollen*“[23].

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Systematisierung von Produktionsfaktoren, welche meist den Ansatz von Gutenberg[24] als Ansatzpunkt nehmen. Für die industrielle Produktion hat sich die Systematisierung nach Kern[25] bewährt (vgl. Abbildung 3).

[19] Vgl. Corsten (1992), S. 13
[20] Vgl. Wöhe (1993), S. 555
[21] Zahn/Schmid (1996), S. 115
[22] Kern (1992), S. 11
[23] Zahn/Schmid (1996), S. 115
[24] Vgl. Gutenberg (1983), S. 2ff.
[25] Vgl. Kern (1992), S. 17

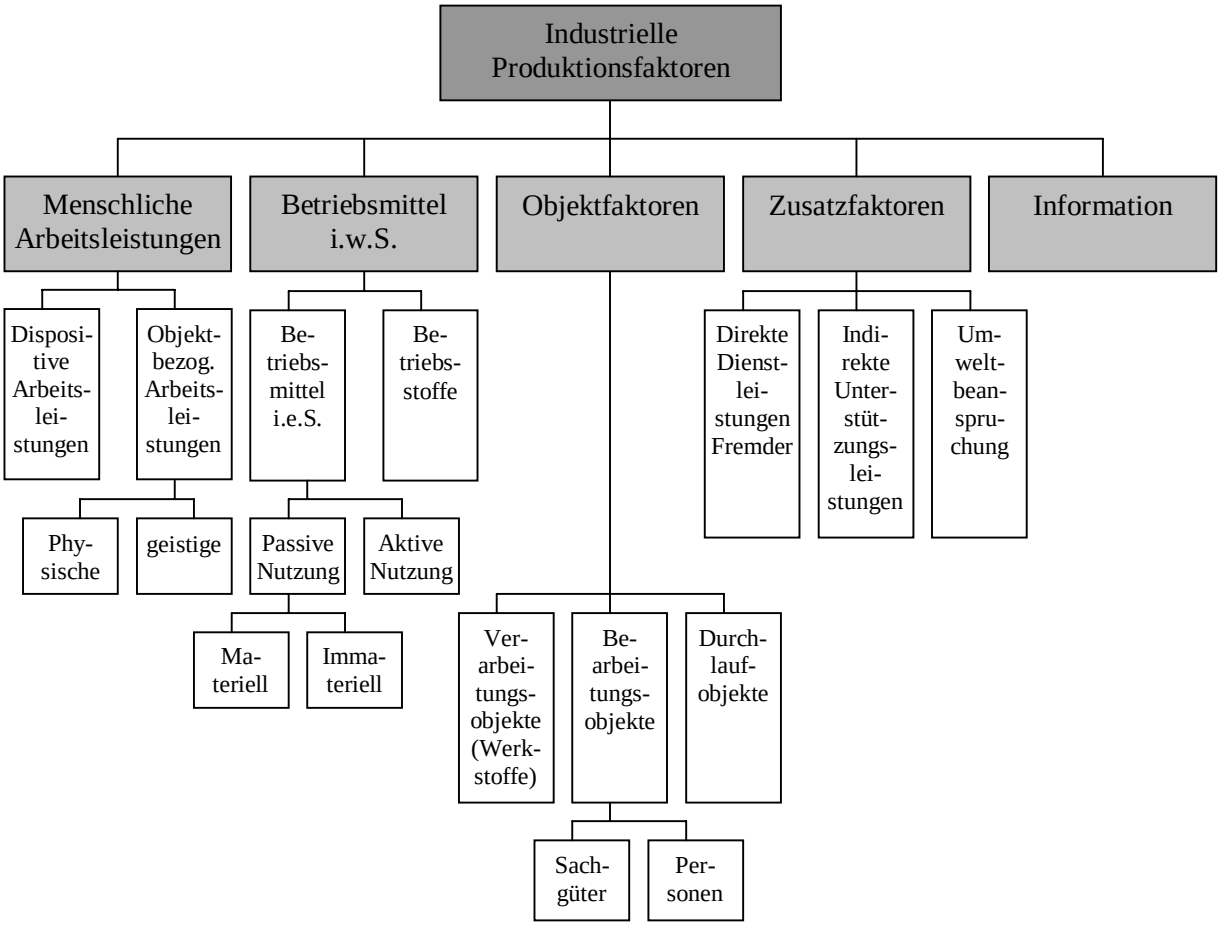

Abb. 3: System industrieller Produktionsfaktoren (in Anlehnung an Kern (1992), S. 17)

Die Unterscheidung der **menschlichen Arbeitsleistung** nach dispositiven und objektbezogenen Funktionen erfolgt nach der traditionellen Aufteilung in *führende* und *ausführende* Tätigkeiten. Dispositive Aufgaben umfassen also die klassischen Managementtätigkeiten der Planung, Organisation, Durchsetzung und Kontrolle, während objektbezogene Arbeit dem herzustellenden Produkt gilt. Letztere läßt sich weiter untergliedern in geistige (z.B. Programmieren, Beraten) und körperliche (z.B. handwerkliche Beschäftigung, Stanzen, Fräsen) Tätigkeiten[26].

Betriebsmittel (i.e.S.) werden in Abhängigkeit davon, ob sie Werkvorrichtungen abgeben oder nicht, in passive und aktive unterschieden. *Passive* Betriebsmittel haben oft eine unbegrenzte Nutzungsdauer. Sie umfassen materielle (z.B. Gebäude, Grundstücke) und immaterielle (Wissen, Patente, Lizenzen) Potentiale. *Aktive* Betriebsmittel hingegen unterliegen einem physischen Verschleiß (z.B. Maschinen, Werkzeuge). Zu den Betriebsmitteln i.w.S. werden noch die Betriebsstoffe hinzugezählt, die den Einsatz der Betriebsmittel i.e.S. erst ermöglichen (z.B. Kraftstoffe, Energie, Schmiermittel)[27].

Objektfaktoren sind zum einen die klassischen **Verarbeitungsobjekte**, d.h. sämtliche Güter, die im Produktionsprozeß verbraucht und zu Bestandteilen der Endprodukte werden (z.B. Rohstoffe, Halbzeuge, Hilfsstoffe wie Schrauben, Nägel,

[26] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 116
[27] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 117

Leim). Zum anderen fallen hierunter industrielle Dienstleistungen, welche in der Kategorie **Bearbeitungsobjekte** zusammengefaßt werden. Dies können sowohl sachbezogene (z.B. Reinigung, Reparatur) als auch personenbezogene (z.B. Beförderung, Behandlung) Dienstleistungen sein. Ergänzt werden die Objektfaktoren durch die Gruppe der Durchlaufobjekte, bei denen es sich um Güter handelt, mit denen der Industriebetrieb selbst Handel betreibt[28].

Zusatzfaktoren drücken die Inanspruchnahme von Inputfaktoren Dritter aus. Dies können direkte Dienstleistungen (z.B. Beratung, Versicherung) oder auch indirekte Unterstützungsleistungen z.B. des Staates (Steuernachlässe, Vergünstigungen) sein. Speziell fällt unter die Gruppe der Zusatzfaktoren auch die Nutzung ökologischer Ressourcen[29].

Schließlich ist es zweckmäßig, die **Information** aufgrund ihrer in nahezu allen Industriebereichen stark gestiegenen Bedeutung als expliziten Produktionsfaktor zu klassifizieren[30].

2.1.5 Produktionsprozeß (=Throughput, Leistungserstellungsprozeß, Kombinationsprozeß)

Hierunter werden die organisationstechnischen Produktions*abläufe* in Industriebetrieben verstanden, in denen die eigentliche Erstellung der Produkte vorgenommen wird[31]: „*Der Throughput eines industriellen Produktionssystems ... sorgt für die zielgerichtete Verknüpfung der Output- und Inputfaktoren; in ihm vollziehen sich die* ***Transformations-*** *bzw.* ***Kombinationsprozesse*** *der Industrieunternehmungen. Konkret können diese Prozesse als eine Folge von Arbeits(vor)gängen sichtbar gemacht werden, die in den einzelnen Arbeitssystemen oder Produktiveinheiten ihre organisatorische Umsetzung erfahren*“[32].

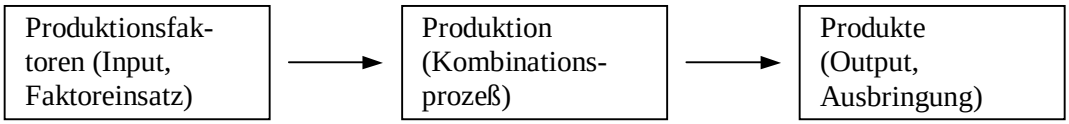

Abb. 4: Produktionsprozeß (Quelle: Wöhe (1993), S. 555)

Die angesprochene Zerlegbarkeit des Produktionsprozesses in einzelne Arbeitsgänge führt unmittelbar zu den folgenden Begriffen:

2.1.6 Fertigungsauftrag und Arbeitsschritt (=Arbeits(vor)gang, Produktionsvorgang, Fertigungsschritt)

Fertigungsaufträge bilden die Basis der Ablaufstruktur des Produktionsprozesses: „*Bei einem Fertigungsauftrag handelt es sich ... um eine zeitlich determinierte Arbeitsanweisung zur Herstellung einer bestimmten Erzeugnismenge*“[33]. Man

[28] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 117
[29] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 118
[30] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 118
[31] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 399
[32] Zahn/Schmid (1996), S. 119
[33] Zahn/Schmid (1996), S. 399

beachte, daß dabei die herzustellende Produktmenge als gegeben betrachtet wird. Im Rahmen der **Terminierung** (=Terminplanung) müssen Anfangs- und Endzeitpunkte von Fertigungsaufträgen determiniert werden. Die spätesten Anfangszeitpunkte für die Durchführung einzelner Fertigungsaufträge müssen aus den vorliegenden Belastungsdaten sowie den daraus ableitbaren Vorlauffristen, ausgehend vom angestrebten Endtermin (Liefertermin), bestimmt werden. Die **Realisierbarkeit** der Fertigungstermine hängt dabei in hohem Maß davon ab, inwiefern die zur Verfügung stehenden Produktionskapazitäten für die Bearbeitung der zeitlich fixierten Fertigungsaufträge ausreichen[34].

Fertigungsaufträge setzen sich aus einer Menge einzelner Arbeitsschritte (=Arbeitsgänge) zusammen, die miteinander verbunden sind bzw. aufeinander aufbauen. **Arbeitsgänge** beziehen sich also auf die Fertigung einer Erzeugnismenge an einem einzelnen Arbeitssystem (vgl. unten). Die Information darüber, durch welche Abfolge der einzelnen Arbeitsgänge der Fertigungsauftrag determiniert wird, ist Bestandteil der **Arbeitspläne** in Industriebetrieben: „*Im **Arbeitsplan** ist die Vorgangsfolge zur Fertigung eines Teiles, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses beschrieben, dabei sind mindestens das verwendete Material sowie für jeden Arbeitsvorgang der Arbeitsplatz, die Betriebsmittel, die Vorgabezeiten ... enthalten*“[35]. Arbeitspläne stellen somit das Bindeglied zwischen den statischen Produktionsstrukturen (in Form von Stücklisten, Teileverwendungsnachweisen) und der fertigungstechnisch bestimmten Produktionsdurchführung dar. Sie beschreiben die Fertigungsvorgänge in der Teileherstellung und der Montage[36].

Eine wichtige Größe im Rahmen der Produktionsdurchführungsplanung stellt die **Durchlaufzeit** eines Fertigungsauftrags dar: Sie „... *gibt die Zeitspanne an, die zwischen dem Beginn des ersten Arbeits- bzw. Produktionsvorganges und der Fertigstellung des Auftrags verstreicht*“[37]. Typischerweise setzt sich die Durchlaufzeit aus Teilgrößen zusammen, die in Industriebetrieben den gleichen, charakteristischen Stellenwert haben (vgl. Abbildung 5).

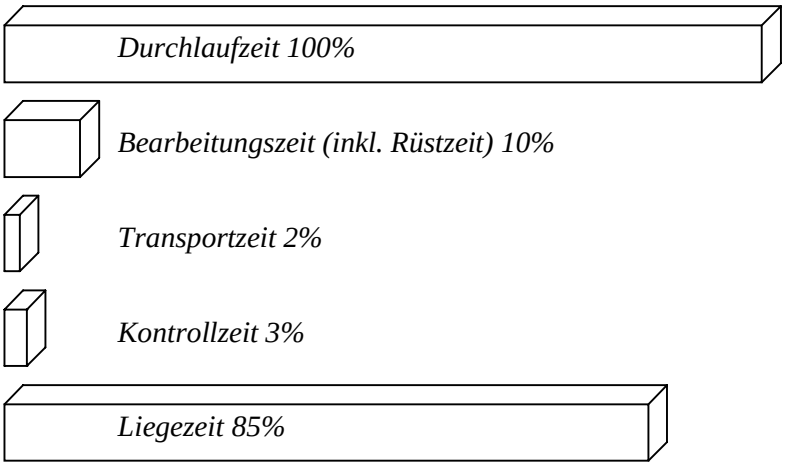

Abb. 5: Typische Struktur der Durchlaufzeit (in Anlehnung an Stommel (1976), S. 143)

[34] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 445f.
[35] REFA (1985), S. 134
[36] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 449
[37] Zahn/Schmid (1996), S. 402

Die Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrags wird durch die arbeitsschrittbezogenen Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags determiniert (vgl. Abbildung 6).

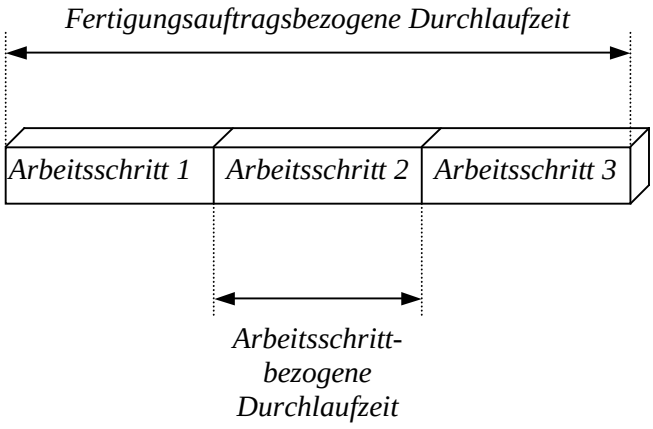

Abb. 6: Durchlaufzeiten (in Anlehnung an Zahn/Schmid (1996), S. 450)

Produktionswirtschaftliche Ziele bestehen u.a. in schnellen Lieferzeiten, einer schnellen Auftragsabwicklung, einer hohen Termintreue, maximaler Kapazitätsauslastung, geringer Kapitalbindung und daraus folgend der Minimierung der Durchlaufzeit[38]. Begründet ist dies dadurch, daß eine kürzere Durchlaufzeit sowohl eine schnellere Belieferung der Auftraggeber möglich macht als auch anfallende Kapitalbindungskosten gesenkt werden können. Problematisch ist dies beim Auftreten einer **Engpaßsituation**: In diesem Fall müssen aufgrund der hohen bzw. im Extremfall maximalen Auslastung des Kapazitätsauslastungsgrads Fertigungsaufträge nach hinten verschoben werden, was durchlaufzeitverlängernd wirkt[39]. Eine Maximierung der Kapazitätsauslastung geht demzufolge zu Lasten der Minimierung der Durchlaufzeiten der Fertigungsaufträge („*Dilemma der Ablaufplanung*“[40]).

2.1.7 Arbeitssystem und Produktiveinheit

Produktionssysteme verkörpern „*die Makrostruktur produktiver Prozesse in Industrieunternehmen*“[41]. **Arbeitssysteme** als kleinste produktive Einheit des Produktionssystems erlauben es noch, sinnvolle Aussagen über die industriellen Produktionsprozesse zu treffen (d.h. das Arbeitssystem erzeugt gemäß der Definition aus Abschnitt 2.1.5 aus einer Menge von Inputfaktoren durch Durchlaufen eines Produktionsprozesses ein definiertes Erzeugnis).

Merkmal eines Arbeitssystems ist das Zusammenwirken von Mensch, Maschine und Werkzeug. Es konzentriert sich unter Beachtung einer vorgegebenen Produktionsaufgabe auf ein bestimmtes Produktionsobjekt. Im kleinsten Fall handelt es sich bei einem Arbeitssystem um einzelne Arbeitsplätze, der Begriff des Arbeitssystems umfaßt aber auch komplexere Fertigungssysteme, die sich aus

[38] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 445
[39] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 404
[40] Zahn/Schmid (1996), S. 404
[41] Zahn/Schmid (1996), S. 112

mehreren Fertigungseinrichtungen und/oder Produktionsmitteln zusammensetzen können[42].

Produktiveinheiten sind Systemeinheiten des industriellen Produktionssystems. Je nachdem, wie weit ein solche Produktiveinheit definiert wird, kann es sich dabei um das gesamte Industrieunternehmen, eine Teileinheit (z.B. Montagebereich) oder im kleinsten Fall um ein einzelnes Arbeitssystem handeln.

2.1.8 PPS (Produktionsplanung und –steuerung) und PPS-Systeme

Die Planung und Steuerung der Leistungserstellung im industriellen Betrieb ist Aufgabe des Produktionsmanagements. **Produktionsplanung** umfaßt die „*systematische Suche und Festlegung der gegenwärtigen Handlungsmöglichkeiten ..., um die zukünftigen Zustände im Produktionsbereich festzulegen*“[43]. Sie entspricht dem **Willensbildungsprozeß**. **Steuerung** ist die Willensdurchsetzung des Plans in die Realität. Aufgabe der **strategischen** Produktionsplanung ist die **Ziel**- bzw. **Strategiefindung** für das Produktionssystem. Die **taktische** Produktionsplanung konkretisiert dies über das Treffen von Entscheidungen bzgl. Leistungsfelder (Produktgestaltung), Personal- und Betriebsmittelkapazitäten sowie die Produktionsorganisation. Inhalt der **operativen** Produktionsplanung und –steuerung schließlich ist ein möglichst optimaler Einsatz des vorhandenen Produktionsapparates im Sinne der Leistungserstellung[44].

Unter **PPS-Systemen** werden alle Anwendungsprogramme verstanden, die die Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsabläufe unter Mengen-, Termin- und Kapazitätsaspekten von der Angebotsbearbeitung bis zum Versand unterstützen[45]. Sie bestehen in der Regel aus folgenden Teilbereichen[46]:

- Grunddatenverwaltung (Speichern und Verwalten aller für die Leistungserstellung notwendigen Daten);
- Produktionsprogrammplanung (=Primärbedarfsplanung; Bestimmung von Absatz- bzw. Produktionszahlen);
- Mengenplanung (=Bedarfsauflösung, Bildung von Fertigungsaufträgen);
- Termin- und Kapazitätsplanung (Festsetzung von Startterminen für die Fertigungsaufträge ausgehend von den geplanten Durchlaufzeiten und Fertigstellungsterminen);
- Auftragsveranlassung (Auftragsfreigabe und konkrete Realisierung eines Fertigungsauftrags);
- Auftragsüberwachung (Erfassung von Rückmeldungen über den Fortschritt der Aufträge sowie über den Zustand der Betriebsmittel und Werkzeuge).

Zu den am häufigsten genannten Zielen, welche durch den Einsatz von PPS-Systemen erreicht werden sollen, gehören eine hohe Termintreue, eine hohe

[42] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 112
[43] Kern (1996), S. 1392
[44] Vgl. Kern (1996), S. 1392f.
[45] Vgl. Wöhe (1993), S. 543
[46] Vgl. Kern (1996), S. 1406 und Wöhe (1993), S. 547ff.

Kapazitätsauslastung, kurze Durchlaufzeiten sowie geringe Lagerbestände. Monetäre Zielsetzungen werden nicht unterstützt[47].

2.1.9 ERP (Enterprise Resource Planing) -Systeme

ERP-Systeme entstanden aus PPS-Systemen. Ihre Grundidee ist es, sämtliche Teilbereiche eines Unternehmens in einer einzigen EDV-Lösung zu integrieren, also neben den klassischen Bereichen der PPS-Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.8) auch Funktionalitäten des Controllings, Personalmanagements, Finanzwesens, Vertriebs etc.[48]. Auf diese Weise sollen es ERP-Systeme ermöglichen, Geschäftsprozesse integriert und über sämtliche Teilbereiche eines Unternehmens zu betrachten[49]. ERP-Systeme werden von verschiedenen Herstellern angeboten, darunter Baan[50], Oracle[51], Microsoft[52] und SAP[53].

Damit sollten die grundlegendsten Begriffe dieser Arbeit eingeführt sein. In den folgenden beiden Abschnitten werden nun die beiden Ansätze des Sonderforschungsbereichs 467 zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit vorgestellt, welche später in das Produktionsoptimierungssystem (Vgl. Kapitel 3 bis 5) eingebunden werden sollen.

2.2 Das Teilprojekt B2: Dynamische Fabrikstrukturen

Die Themenstellung des Teilprojekts B2 des Sonderforschungsbereichs 467 liegt im Aufbau und in der Adaption von **Fabrikstrukturen**. Die Konfiguration bzw. Rekonfiguration in Produktionssystemen wird dabei als klassische Planungsaufgabe für Fertigungsunternehmen angesehen. In der älteren Literatur wird sie als einmaliger Prozeß innerhalb eines Projektes durchgeführt. Neuere Ansätze stellen dies in Frage und betonen den **stetigen Charakter** des Planungsprozesses, der sowohl die Anpassung der dynamischen Fabrikstrukturen an veränderte Umweltbedingungen kontinuierlich prüft als auch Anpassungsvorschläge im Rahmen der tatsächlichen Planung erarbeitet. Folglich müssen nicht nur Produktionsplanung und –steuerung **kontinuierlich** erfolgen, sondern auch **die Planung der Struktur der Produktionssysteme**[54].

Klassische Ansätze der Fabrikplanung weisen einen hohen Zeitbedarf auf. Dies ist auf die Vielzahl organisatorischer Schnittstellen, welche überwunden werden müssen, sowie auf die arbeitsteilige Durchführung und die häufige Zentralisierung der Planungsarbeit zurückzuführen. Zur Realisierung einer quasi kontinuierlichen Planung sind daher im Rahmen einer Reduzierung der Planungszeit insbesondere für die Betriebsmittel- und Arbeitsplatzgestaltung und für die Gebäudestruktur- und Bereichsplanung neue Planungskonzepte, -methoden und -werkzeuge zu entwickeln,

[47] Vgl. Wöhe (1993), S. 547
[48] Vgl. Yeung (1999), S. 77-1
[49] Vgl. Gileadi (1999), S. 76-1
[50] Vgl. Baan (2001)
[51] Vgl. Oracle (2001)
[52] Vgl. Microsoft (2001)
[53] Vgl. SAP (2001)
[54] Vgl. Westkämper (1999), S. 222f.

die eine erhöhte Selbstorganisation und damit verbundene Dezentralisierung in der Planung ermöglichen, ohne die Qualität der eingesetzten Verfahren zu reduzieren[55].

Die vorliegende Arbeit nimmt im besonderen Bezug auf die Ergebnisse der Ansätze des Teilprojekts B2 zur **Layoutplanung**. Hierunter (in der Literatur auch als „innerbetriebliche Standortplanung“[56] bezeichnet) ist die Planung der räumlichen Strukturen des Produktionsbetriebes zu verstehen. Grundgedanke ist es, eine gegebene Anzahl von Objekten, zwischen denen Beziehungen existieren, optimal zueinander anzuordnen. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang hinsichtlich eines Ziels oder mehrerer Ziele unter Beachtung bestimmter Restriktionen, also beispielsweise eine Anordnung in der Art, daß die durch den Materialfluß verursachten Transportkosten minimiert sind[57]. Klassische Ansätze zur Erstellung von Geometrie- und Layoutstrukturen erstrecken sich meist auf den Einsatz von CAD-Systemen. Die Planung der räumlichen Anordnung ist dabei überwiegend durch eine zweidimensionale Darstellung geprägt. Aus heutiger Sicht wird neben der Integration von Elementen der virtuellen Realität auch die dreidimensionale Betrachtung der Fabrikstrukturen gefordert[58].

Im Teilprojekt B2 wurde ein Werkzeug zur partizipativen Fabrikplanung entwickelt, welches aus folgenden vier Komponenten besteht, wobei die Bausteine 1 und 2 die Verbesserung der Kommunikation in der Planung erzielen sollen, während die Bausteine 3 und 4 die notwendige Systemintegration realisieren[59]:

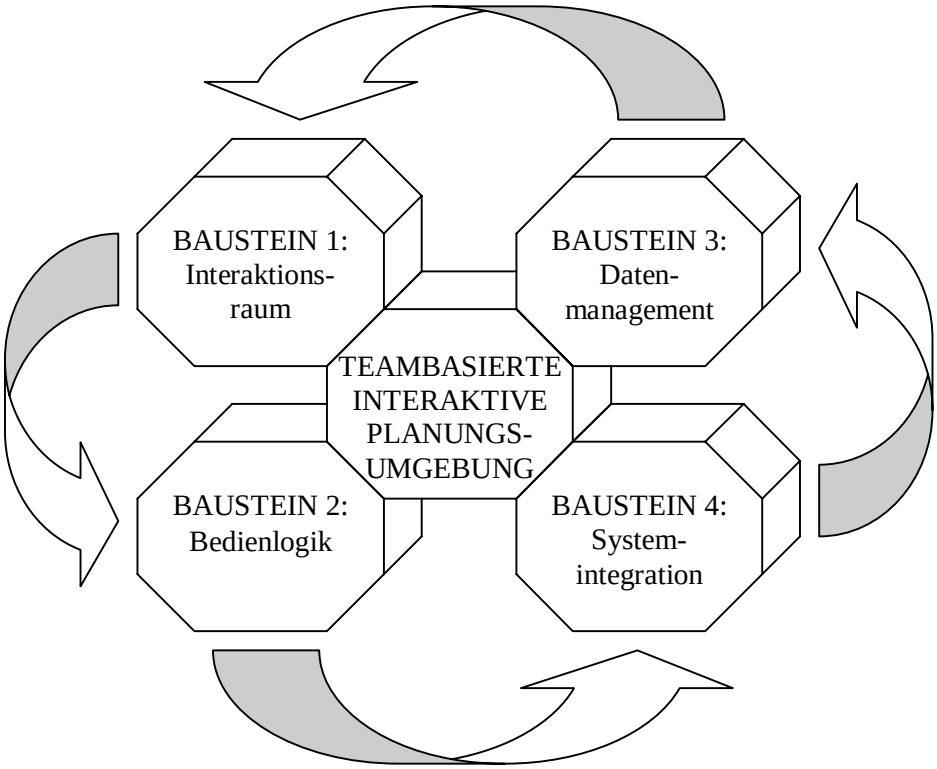

Abb. 7: Bausteine der partizipativen Fabrikplanung (Quelle: Westkämper (1999), S. 258)

[55] Vgl. Westkämper (1999), S. 227f.
[56] Corsten (1992), S. 387
[57] Vgl. Corsten (1992), S. 387
[58] Vgl. Westkämper (1999), S. 228
[59] Vgl. Westkämper (1999), S. 258

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Fabrikplanung besteht dabei darin, Elemente des Produktionssystems (z.B. Maschinen oder Fertigungsbereiche) in Form von dreidimensionalen Modellen darzustellen, welche nicht nur Flächeneigenschaften besitzen, sondern darüber hinaus auch weitere Informationen aufnehmen können[60].

Baustein 1 (Interaktionsraum): Mit Hilfe eines Beamers wird ein zweidimensionales Abbild des zu planenden Bereichs über einen Spiegel auf einen herkömmlichen Tisch gelenkt. Parallel dazu wird auf einer zweiten Projektionsfläche eine dreidimensionale Ansicht des Planungsbereiches dargestellt. Das Bild des Tisches wird durch eine Kamera abgegriffen. Die Interaktion erfolgt über Metallklötze („*bricks*“), die aufgrund einer reflektierenden Oberseite von der Kamera erfaßt werden können.

Baustein 2 (Bedienlogik): Die Planungsfläche besteht aus dem Planungsbereich, in welchem die Objekte der Fabrik angeordnet werden, und einem Bedienbereich. Die Auswahl einer Betriebsmittelgruppe erfolgt durch Ablegen des *bricks* auf die in der Projektion dargestellte Betriebsmittelgruppe. Das Bewegen von Betriebsmitteln erfolgt durch Bewegen des *bricks* im Planungsbereich. Durch Ablegen des *bricks* wird die Maschine an der neuen Stelle positioniert.

Baustein 3 (Datenmanagement): Das Datenmodell steht neben der visuell orientierten Modellierung parallel für andere Anwendungen zur Verfügung. Interaktionen in der Planungsfläche werden unmittelbar in einer relationalen Datenbank erfaßt und protokolliert. Darüber hinaus kann der Interaktionsraum durch andere Systeme über die Datenbank konfiguriert bzw. manipuliert werden.

Baustein 4 (Systemintegration): Diese erfolgt über die für das Datenmanagement zuständige Datenbank. Sie umfaßt die Abdeckung der Schnittstellen zu anderen Bereichen der Fabrikplanung (z.B. Dokumentation, Bewertung)[61].

2.3 Das Teilprojekt C1: Kooperative Planung und Steuerung in dynamischen Prozeßketten

Ziel des Teilprojekts C1 des Sonderforschungsbereichs 467 ist die Konzeption und prototypische Realisierung eines **Auftragsmanagementsystems** (AMS), welches als Kern eines zukünftigen PPS-Systems in einer sich rasch verändernden Produktionsumgebung fungieren kann[62]. Aufgabe des operativen **Auftragsmanagements** ist die mengen- und zeitmäßige sowie örtliche Zuordnung von benötigten Ressourcen zu (Kunden-)Aufträgen. Durch Festlegen sog. **Synchronisationspunkte** ist das **Ablaufgeschehen der Produktion** bestimmt. Das Auftragsmanagementsystem faßt die zur Umsetzung des Auftragsmanagements notwendigen Strukturen zusammen. Es ist ein ideelles und/oder reelles Instrument zur flexiblen und wirtschaftlichen Abwicklung von Kundenaufträgen[63]. Das traditionelle PPS-Verständnis wird um die **gleichwertige Betrachtung aller Produktionsressourcen** im Sinne des Enterprise Resource Planning (ERP) (im Gegensatz zur reinen Mengenbetrachtung) und um die **Entwicklung neuer**

[60] Vgl. Westkämper (1999), S. 258f.
[61] Vgl. Westkämper (1999), S. 258f.
[62] Vgl. Westkämper (1999), S. 324
[63] Vgl. Westkämper (1999), S. 327

Methoden zur Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung erweitert, wobei der **zyklische, iterative Charakter** der Produktionssystemplanung hervorgehoben wird[64]. Die Zielsetzung der Produktionssystemplanung besteht u.a. in der Analyse der Betriebsmittelbelegung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Produktionsmixe. Dadurch kann ermittelt werden, inwiefern die geforderte Leistung auf den bestehenden Betriebsmitteln erbracht werden kann. Im Rahmen des Auftragsmanagementansatzes wurde daher ein **Prüfstandsystem** (Auftragsmanagementprüfstand) entwickelt, mit welchem sich der Produktionsablauf simulieren läßt. Es handelt sich also um ein Verfahren zum Test der eingesetzten PPS-Methode[65].

Modelliert wird der Produktionsablauf über die Wege, welche die einzelnen Arbeitsgänge durch das Netz der Arbeitssysteme nehmen. Dies läßt sich aus den vorhandenen Arbeitsplänen ableiten. Die Simulation bezieht sich dabei auf einen festen Zeitraum, d.h. es werden alle Fertigungsaufträge eines bestimmten Zeitraums gesammelt und anschließend analysiert. Als Ergebnis der Simulation erhält der Anwender eine Aufstellung der Zeitpunkte, wann welcher Arbeitsgang an welchem Arbeitssystem erfolgte. Diese Sammlung von Simulationsdaten wird als ***Tracefile*** bezeichnet.

Der Auftragsmanagementprüfstand arbeitet auf Basis einer Reihe von Daten, mit deren Hilfe das Produktionssystem modelliert wird, darunter die Menge der vorhandenen Arbeitssysteme einschließlich ihrer Kapazitäten und Kennzahlen (Rüst- und Prozeßzeiten), die Arbeitspläne für den Planungszeitraum sowie ein Abbildungsmodell für die geplanten Arbeitsschichten. Zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit[66] konnte mit dem Auftragsmanagementprüfstand nur die einfache Teilefertigung simuliert werden, d.h. Fertigungskonzepte wie die Fließfertigung erfuhren keine Abbildung im obigen Modell. Man beachte, daß es sich um ein reines Simulationswerkzeug handelt, d.h. die eigentliche Terminplanung der Produktion (Wann *soll* welcher Arbeitsschritt an welchem Arbeitssystem ausgeführt werden?) kommt von außerhalb als Eingabedatum in Form der Arbeitspläne. Die Simulation erlaubt es im Anschluß an die Planung, Aussagen über die *tatsächliche* Ausführung von Arbeitsgängen zu treffen (Wann *wurde* im Rahmen der Simulation welcher Arbeitsschritt an welchem Arbeitssystem ausgeführt?). Durch Analyse lassen sich aus den Simulationsdaten speziell auch Erkenntnisse über etwaige Engpässe des Produktionssystems gewinnen. Diese Analyse ist jedoch nicht Bestandteil des Auftragsmanagementprüfstands. Weitere Kennzahlen, die sich aus dem *Tracefile* ableiten lassen, betreffen die durchschnittliche Auslastung und Durchlaufzeit an jedem Arbeitssystem.

2.4 Verwandte Forschungen

2.4.1 Das „Virtuelle Produktionsoptimierungssystem“ von Heinkel

In der Diplomarbeit „Informationsmodelle für wandlungsfähige Produktionssysteme“[67] an der Universität Stuttgart wurde die grundlegende Konzeption eines „*virtuellen*

[64] Vgl. Westkämper (1999), S. 325f.
[65] Der folgenden Darstellung zum Auftragsmanagementprüfstand liegen die Ausführungen von Herrn Dipl.-Ing. Benno Löffler (Mitarbeiter des Teilprojekts C1) im Rahmen einer Besprechung vom 7. Mai 2001 zugrunde.
[66] Stand: August 2001
[67] Vgl. Heinkel (2000), S. 75ff.

Produktionsoptimierungssystems“[68] gelegt, welches zur Optimierung eines Produktionssystems nach Aufbau und Ablauf die Teilsysteme Fabriklayoutplanung (vgl. Abschnitt 2.2) und Auftragsmanagementprüfstand (vgl. Abschnitt 2.3) miteinander koppeln soll.

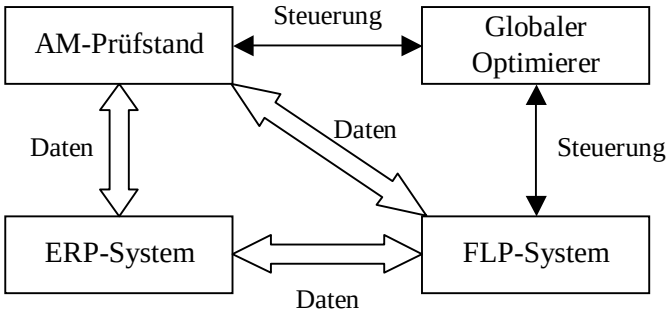

Abb. 8: Globaler Optimierer als Steuerkomponente (Quelle: Heinkel (2000), S. 80)

Der globale Optimierer übernimmt hierbei nur die Ansteuerung der beiden Teilsysteme, benötigte Daten werden direkt zwischen den Teilsystemen ausgetauscht. Die Steuerung läuft über Nachrichten ab, welche Planungsaufträge und Planungsergebnisse enthalten (vgl. Abbildung 8). Die beteiligten Systeme werden in ein ERP-System integriert.

Die von Heinkel beschriebenen Ansätze stellen ein Rahmenwerk für weitere Forschungsarbeiten dar, die konkrete Ausgestaltung des globalen Optimierers aus algorithmischer Sicht bleibt offen. Gleichsam sind die beschriebenen Ansätze Grundlage für die Entstehung der vorliegenden Arbeit.

2.4.2 Der Forschungsansatz des Teilprojekts A1

Das Teilprojekt A1 („Methoden der Systemadaption“) des Sonderforschungsbereichs 467 befaßt sich mit dem Einsatz von **Evolutionstechniken** auf Produktionssysteme, genauer mit der methodischen Unterstützung des Anwenders bei Konfigurationsentscheidungen auf der Basis von Evolutionstechniken[69]. Anhand beispielhafter Fragestellungen werden grundlegende Methoden der Planung, Optimierung und Adaption entwickelt. Unter Optimierung werden Maßnahmen zur Erzeugung einer Wirkungsweise eines Systems verstanden, so daß unter gegebenen Nebenbedingungen und Beschränkungen das Gütekriterium einen entweder möglichst großen oder kleinen Wert annimmt. Bezogen auf die Optimierung von Produktionssystemen wird also die Konfiguration gesucht, bei dem je nach Gewichtung z.B. die Effizienz am größten, die Kosten minimal oder die Termintreue maximal wird[70].

Evolutionsstrategien sind zusammen mit den genetischen Algorithmen, der genetischen Programmierung und der evolutionären Programmierung in die Gruppe der evolutionären Algorithmen einzuordnen. Es handelt sich dabei um Methoden, die die Mechanismen der Evolution zur Optimierung nutzen. Abbildung 9 zeigt den grundsätzlichen Ablauf einer Optimierung mit Evolutionsstrategien.

[68] Heinkel (2000), S. 3
[69] Vgl. Westkämper (1999), S. 23
[70] Vgl. Westkämper (1999), S. 31

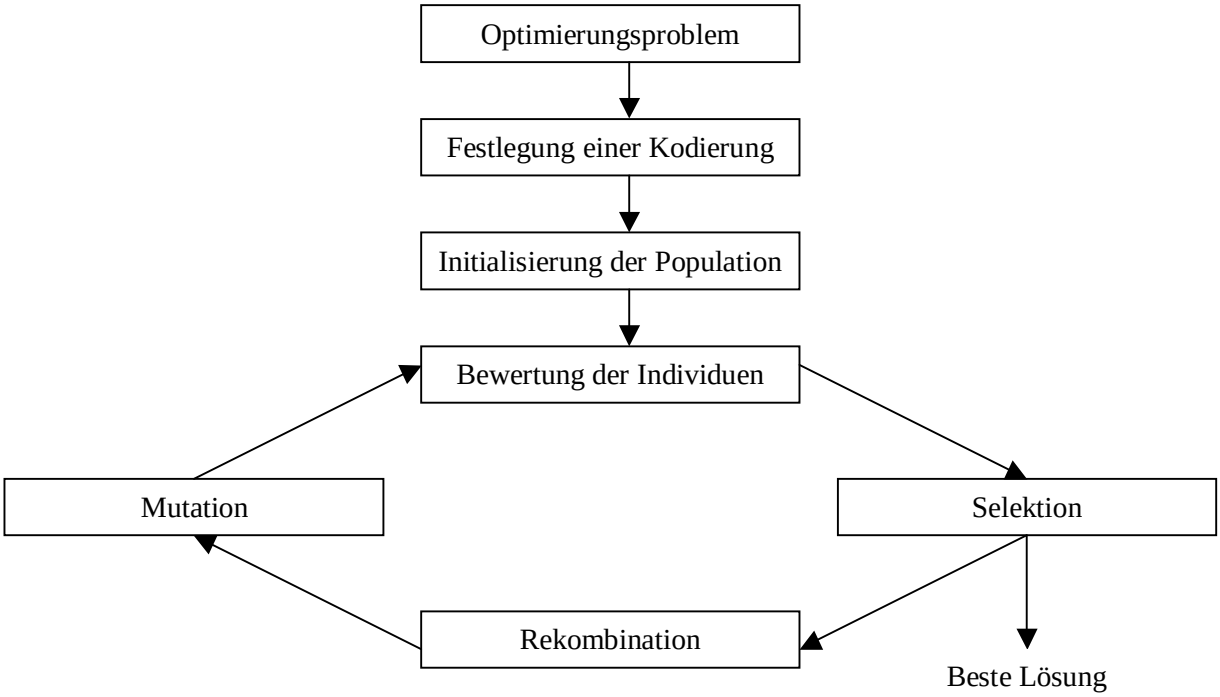

Abb .9: Ablauf einer Optimierung mit Evolutionsstrategien (in Anlehnung an Westkämper (1999), S. 35)

Bei der Selektion werden die Individuen entsprechend ihrer Fitness an der Erschaffung neuer Individuen beteiligt, wobei Individuen mit geringer Fitness aus der Population ausgesondert werden, so daß die Zahl der Individuen begrenzt bleibt. In der Rekombination erfolgt die Neukombination von Erbmaterial, wobei es das Ziel ist, gute Eigenschaften, die auf mehrere Individuen verteilt sind, zusammenzuführen. Die Mutation schließlich erzeugt stochastische Änderungen am Genotyp. Auf diese Weise lassen sich neue Lösungen schaffen, die so bisher noch nicht in der Population aufgetreten sind[71].

Umgesetzt wird dies im Rahmen des Teilprojekts A1 durch die Entwicklung des Evolutionssimulators „*EvoSim*“. Als Anwendungsfall wird das Fabriklayoutsystem des Teilprojekts B2 (vgl. Abschnitt 2.2) eingesetzt. Das Fabriklayout eines wandlungsfähigen Unternehmens soll an ein vorgegebenes Auftragsspektrum angepaßt werden, d.h. die Koordination der Bearbeitungsmaschinen soll derart optimiert werden, daß das Fabriklayout hinsichtlich Kapitalbindung und Durchlaufzeit optimiert wird[72].

Evolutionäre Algorithmen haben sich im Vergleich zu anderen Optimierungsverfahren besonders in hochdimensionalen Suchräumen als leistungsfähig erwiesen. Unbeantwortet bleiben hingegen Fragen der dynamischen Adaption (das Layout soll nicht komplett, sondern nur stufenweise umgestaltet werden) und der Optimierung teilautonomer Einheiten unter Beachtung von Wechselbeziehungen und Kooperations- und Konkurrenzbeziehungen. Beide Fragestellungen spielen eine zentrale Rolle bei der Adaption von Produktionsnetzwerken[73].

[71] Vgl. Westkämper (1999), S. 35f.
[72] Vgl. Westkämper (1999), S. 51ff.
[73] Vgl. Westkämper (1999), S. 59

2.4.3 Integrierte Ansätze nach Corsten

Corsten beschreibt das Grundkonzept eines Systems zur integrierten Gestaltung und Durchführung der betrieblichen Produktionsplanung und -steuerung und der damit verbundenen Datenverwaltung. Das betriebswirtschaftliche Ziel der Kostenminimierung (Minimierung von Produktions-, Transport-, Rüst- und Lagerkosten) wird aufgrund von Problemen bei der Kostenerfassung durch Zeitziele substituiert. Hierzu gehören minimale Durchlaufzeiten, hohe Termintreue, niedrige Lagerbestände und eine maximale Kapazitätsauslastung[74].

Simultane Planungsansätze, die die Handlungsalternativen sämtlicher betroffener Teilbereiche innerhalb eines Totalmodells integrieren und eine gleichzeitige Bestimmung der jeweils optimalen Werte der Handlungsalternativen in gegenseitiger Abstimmung vornehmen, wären nach Corsten *konzeptionell* am besten zur Lösung der skizzierten Problemstellung geeignet. Sie scheitern in der Praxis jedoch aufgrund folgender Probleme:

- Erkennung und adäquate Abbildung sämtlicher Interdependenzen im Modell;
- Probleme hinsichtlich Datenbeschaffung und -pflege;
- Komplexität des Modells: Die Abbildung sämtlicher Entscheidungsvariablen der Produktionsplanung und -steuerung unter Beachtung ihrer Auswirkungen auf Kosten und Erlöse unter Beachtung der Ressourcenbeanspruchung führen zu einem hochkomplexen, nichtlinearen Optimierungsmodell[75].

Sukzessive Planungsansätze zeichnen sich dadurch aus, daß die zu planenden Teilbereiche in einer festzulegenden Reihenfolge nacheinander bearbeitet und damit Interdependenzen zerschnitten werden[76]. Hierbei erfolgt eine Komplexitätsreduktion durch die Zerlegung des Gesamtproblems in weitgehend abgeschlossene und vergleichsweise einfache Teilprobleme, welche nacheinander zu einer Gesamtlösung zugeführt werden (**vertikale Dekomposition** des Gesamtproblems)[77].

Der Aufbau eines EDV-gestützten PPS-Systems erfolgt unter Einsatz der vertikalen Dekomposition, so daß einzelne Planungsebenen sukzessive durchlaufen werden. Dabei werden Teillösungen i.d.R. nicht durch den Einsatz optimierender, sondern heuristischer Verfahren gelöst. Abbildung 10 zeigt die grundsätzliche Struktur eines solchen Stufenkonzepts auf.

Aufgabe der Layoutplanung ist, wie bereits beschrieben, die räumliche Anordnung der eingesetzten Produktionsmittel. Die Programmplanung legt die zu produzierenden Gütermengen fest. Sie basiert auf Absatzprognosen oder bestehenden Kundenaufträgen. Hieraus erfolgt in der Mengenplanung die mengen- und zeitmäßige Planung von Rohstoffen, Einzelteilen und Baugruppen, welche zur Herstellung des geplanten Outputs benötigt werden. Darauf aufbauend erfolgt die Termin- und Kapazitätsplanung. Auf Basis von Arbeitsplänen und geplanten Durchlaufzeiten lassen sich Start- und Endtermine der Fertigungsaufträge ermitteln.

---

[74] Vgl. Corsten (1992), S. 436f.
[75] Vgl. Corsten (1992), S. 438
[76] Vgl. Corsten (1992), S. 437
[77] Vgl. Corsten (1992), S. 438

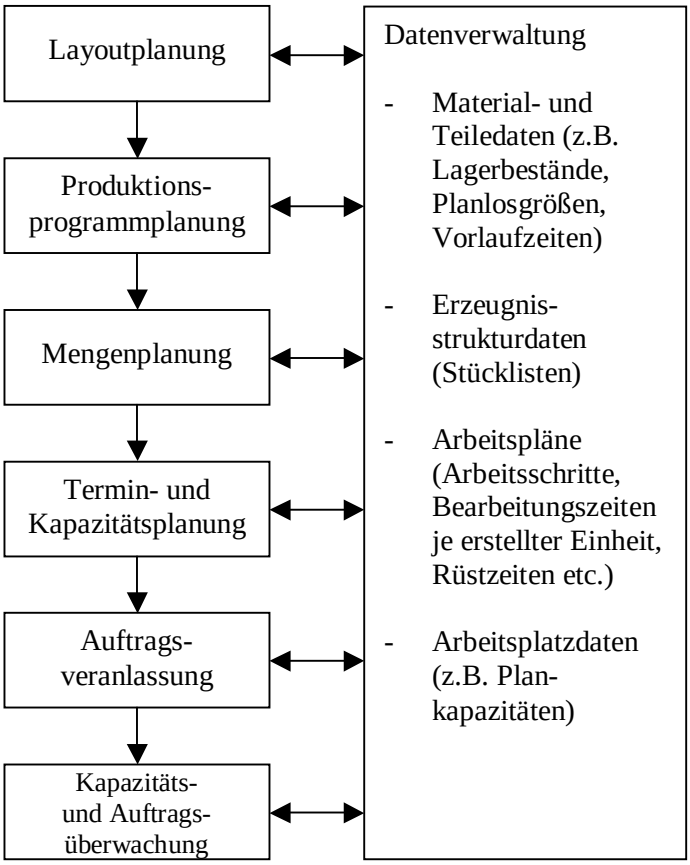

Abb. 10: Grundsätzliche Struktur des Stufenkonzepts (in Anlehnung an Corsten (1992), S. 439)

Diese werden im Rahmen der Auftragsfreigabeveranlassung gestartet. In der Kapazitäts- und Auftragsüberwachung erfolgt schließlich die fortlaufende Überwachung des Produktionsgeschehens[78].

[78] Vgl. Corsten (1992), S. 440ff.

3. Konzeption

3.1 Ein Beispielszenario

Zur Einführung der Grundkonzeption des Produktionsoptimierungssystems soll das von Rogers/Upton/Williams (1992)[79] angeführte Beispiel des englischen Kabel- und Drahtherstellers BICC aufgegriffen werden.

BICC sah sich aufgrund des verstärkten Drucks am Markt veranlaßt, den Produktionsprozeß durch den Einsatz von **CIM-Technologien**[80] effizienter und effektiver zu gestalten, um so die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu garantieren. Das zugrunde liegende Programm wurde in der bestehenden Fertigungsfabrik Melling in Merseyside, England, umgesetzt. Die Fabrik in Melling produzierte ein breites Spektrum an PVC-isolierten Kabeln. Aufgrund ihrer Beschaffenheit als unabhängige Produktionsstätte erlaubte sie es, die Vorzüge des Einsatzes der CIM-Technologien den daraus resultierenden Kosten exakt gegenüberzustellen. Als kritische Zielgrößen wurden identifiziert: Kostenreduktion und verbesserte Qualität bei schnellerem und flexiblerem Kundenservice. Es wurde erkannt, daß ein solcher Ansatz sowohl **Änderungen in der Managementstruktur** als auch in der **Produktions-organisation** notwendig machen würde.

Die Umsetzung geschah in folgenden Phasen:

Zunächst wurde des Spektrum der hergestellten Produkte (über 300 verschiedene, zusammengesetzt aus 1500 unterschiedlichen Rohmaterialien) in klar definierte **Produktfamilien** eingeteilt. Das **Layout** der Produktionsfabrik wurde derart umgestaltet, daß sog. *areas* gebildet wurden, welche die vollständige Verantwortung für die Fertigung ähnlicher (Zwischen-)Produkte erhielten. Die Fertigung selbst wurde durch den Einsatz von **Automatisierungstechnologien** (klar definierte Start-Up- und Shut-Down-Sequenzen für die einzelnen Maschinen, Überwachungssysteme zur Qualitätssicherung und Vermeidung von Überbenutzung teurer Materialien) gestrafft, die Planungsmethode auf ***just-in-time***[81] festgesetzt. Die einzelnen Systeme wurden schließlich untereinander **vernetzt** und an einen zentralen Rechner gekoppelt, an welchem alle wichtigen Daten über Aufträge, Verkaufszahlen, Liefertermine etc. vorlagen.

Nach Einführung der CIM-Technologie im Fall BICC war es innerhalb von 5 Jahren gelungen, bei gleicher Maschinenanzahl den Gesamtoutput zu verdoppeln sowie die Produktivität pro Person zu vervierfachen[82].

---

[79] Vgl. Rogers/Upton/Williams (1992), S. 663ff.

[80] Computer Integrated Manufacturing: Alle Tätigkeiten, die sinnvoll durch Rechner unterstützt werden können, sollen integriert werden: Von der Entwicklung bis zur Montage und noch weiter: Vom Vertrieb bis zum Versand; Vgl. Kern (1996), S. 292ff.

[81] Das *just-in-time*-Prinzip besagt, daß eine Produktion erst auf Abruf durch nachgelagerte Stufen ausgelöst werden soll, so daß im Idealfall keine Zwischenlagerbestände auftreten - Vgl. Domschke/Scholl/Voß (1993), S. 21

[82] Vgl. Rogers/Upton/Williams (1992), S. 665.

3.2 Die Grundideen des Produktionsoptimierers

Es mag an dieser Stelle erstaunen, daß CIM, „einst Werbeträger Nr. 1 der Computerindustrie“[83], aus der Mode gekommen ist[84]. Bei näherer Betrachtung des oben beschriebenen Beispiels tauchen jedoch folgende Fragestellungen auf, die die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen, vor allem vor einem **langfristigen Hintergrund**, anzweifeln lassen:

- Es handelte es um einen revolutionären und **einmaligen** Prozeß zur Umgestaltung des Produktionsablaufs. Kann der so erarbeitete Wettbewerbsvorsprung auf diese Weise **dauerhaft** gehalten werden? Wäre nicht eine **kontinuierliche** Anpassung der Produktion an sich verändernde Umstände von Vorteil?
- Inwiefern ist der CIM-Ansatz **flexibel** in der Weise, daß sich Ziele hinsichtlich der Optimierung des Produktionsablaufs mit der Zeit ändern bzw. sich deren Gewichtungen untereinander verschieben können?
- Wie kann sichergestellt sein, daß die getroffenen Maßnahmen tatsächlich einen **optimalen** Produktionsablauf herbeiführen? Sind sie ggf. nur ein Schritt auf dem Weg zum Optimum? Inwiefern lassen sich Vergleiche mit anderen Maßnahmen anstellen?

Es geht allerdings nicht darum, die Ansätze des CIM als unbrauchbar abzutun. Vielmehr soll auf ihrer Basis ein Verfahren zur Optimierung des Produktionsablaufs entwickelt werden, welches die oben beschriebenen Unzulänglichkeiten zu lösen versucht.

Zur Einführung der Grundgedanken des Produktionsoptimierers sei wieder auf das Beispiel BICC aus Abschnitt 3.1 verwiesen:

- Am Anfang stand der Entwurf eines neuen Layouts der Produktionsstätte auf Basis definierter Produktfamilien. Neuere Layoutalgorithmen unterstützen weitere Zielfunktionen wie z.B. eine bestimmte Flächennutzung in % oder die Unterstützung bestimmter Fertigungsvarianten (z.B. Zellenfertigung)[85].
- Zur Wahrung der Flexibilität ist die Möglichkeit zu einem periodischer Neuentwurf des Layouts anstrebenswert, d.h. die Möglichkeit, den Standort von Arbeitssystemen innerhalb der Produktionsstätte flexibel anpassen zu können.
- Die Effizienz und Effektivität der Produktion soll fortlaufend, gemessen an definierten Zielgrößen, abschätzbar sein. Es soll die Möglichkeit bestehen, verschiedene *Szenarien* für die Produktion zu entwerfen und zu bewerten und aus diesen das geeignetste herauszufinden.
- Die Schwachstellen des Produktionsablaufs sollen herausgefiltert werden. Stauen sich vor einer Produktionseinrichtung große Mengen von Zwischenerzeugnissen für die Weiterverarbeitung, so liegt ein **Engpaß** vor. Es soll die Möglichkeit gegeben werden, alternative Lösungen zur Umgehung einer solchen Schwachstelle aufzufinden und zu bewerten.

[83] Vgl. Geitner (1996), S. 292
[84] Vgl. Geitner (1996), S. 292
[85] Vgl. Westkämper (1999), S. 229

- Die Wechselwirkungen zwischen diesen Aspekten sollen nicht unberücksichtigt bleiben. Vielmehr wird eine **integrierte Betrachtungsweise** angestrebt.

Übertragen auf das zitierte Beispiel von BICC ergibt sich folgende *Vision* eines neuen Produktionsoptimierungssystems:

Die Zusammenfassung zu Produktfamilien erfolgt wie oben angeführt (**Reorganisationsmaßnahme**). Anschließend wird das **Layout** der Fabrik unter mehrfachen Aspekten generiert, wobei es sich um einen ersten Entwurf handelt. Maschinen sind, soweit möglich, nicht fest an einen Aufstellungspunkt gebunden, sondern lassen sich flexibel verschieben. **Automatisierungstechnologien** werden, wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, eingeführt. Ihre **Vernetzung** untereinander sowie die Kopplung an ein zentrales System (ERP-System) erfolgt analog. Im ERP-System sind alle relevanten Daten über den Produktionsablauf, z.B. Bestand an Arbeitssystemen, Fertigungsaufträgen, Schichtzeiten, auch Zielgrößen und Zielgewichtungen gespeichert. Aus diesen Daten werden durch Simulation **Kennzahlen** abgeleitet, die den Produktionsprozeß beschreiben und Aussagen über kritische Stellen (anhand der Höhe der Materialströme) und Schwachpunkte (z.B. Engpässe) zulassen. Zur Beseitigung der Schwachstellen werden **Lösungen** erarbeitet, die entweder auf Beeinflussung der Struktur der **Arbeitssysteme** (z.B. Hintereinanderschalten von zwei Arbeitssystemen mit besonders hohem Materialfluß zu *einem* logischen Arbeitssystem[86]) oder der **Fertigungsaufträge** und **Arbeitsschritte** (Umplanung von Aufträgen, um Engpässe zu vermeiden) bestehen. Es erfolgt anschließend die Berechnung eines neuen Layouts für die Fabrik, basierend auf den oben generierten Daten sowie unter Beachtung der veränderten Gegebenheiten.

Durch **iteratives Wiederholen** dieser Vorgehensweise kann **ein optimaler Produktionsaufbau und -ablauf** (im folgenden vereinfacht „*Produktionsablauf*“) bestimmt werden. Dieser wird letztendlich realisiert (Umsetzung des Layouts in der Produktionsstätte, Übernahme der zeitlichen Planung der Fertigungsaufträge und der veränderten Arbeitssystemestruktur). Der skizzierte Prozeß wiederholt sich bei jeder Änderung der zentral abgelegten Daten, z.B. bei Änderung von Zielgrößen oder -gewichtungen, bei Neueingang eines Auftrags, bei geänderten Betriebsbelegungen (Arbeitszeiten) etc.

Die Konzeption des beschriebenen **Produktionsoptimierungsprozesses** geht auf die Arbeit von Heinkel[87] („*Virtueller Produktionsoptimierer*“) zurück, in welcher der grundlegende Ablauf erstmals skizziert wird (vgl. auch Kapitel 2.4.1). Heinkel bezieht jedoch lediglich Verfahren zur Layoutplanung sowie zur Simulation des Fertigungsablaufs (Auftragsmanagementprüfstand) in seine Konzeption ein, die zeitliche Planung des Fertigungsablaufs bleibt unberücksichtigt. Wie sich im Rahmen des Entstehens dieser Arbeit herausstellte, ist dieser Ansatz problematisch, wenn die Bedeutung der beiden Teilsysteme Layoutplanung und Auftragsmanagementprüfstand für den Fertigungsablauf betrachtet wird:

- Ein verändertes Layout hat zur Folge, daß die **Transportzeiten** zwischen den eingesetzten Arbeitssystemen gesenkt werden. Dies ist nützlich, da die

[86] Eine solche Funktionalität war zur Aufnahme in das Fabriklayoutplanungssystem geplant, jedoch zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit (Stand Juni 2001) noch nicht realisiert.
[87] Vgl. Heinkel (2000), S. 75ff.

Transportzeit eine der Komponenten der **Durchlaufzeit** ist und, wie bereits in den Grundlagen aus Kapitel 2 dargelegt, die Minimierung der Durchlaufzeit ein wichtiges Optimierungsziel ist. Allerdings ist der **Einflußbereich** der Transportzeit auf die Durchlaufzeit nur sehr gering - die Transportzeit macht typischerweise 2% der gesamten Durchlaufzeit aus[88] (vgl. auch Abbildung 5).

- Der Auftragsmanagementprüfstand ist ein **Simulationswerkzeug**[89], mit ihm können lediglich Produktionsabläufe **ausgewertet** werden. Der Auftragsmanagementprüfstand nimmt jedoch selbst **keine optimierenden Tätigkeiten** am Produktionsablauf vor.

Eine Kopplung der beiden Teilsysteme Layoutplanung und Auftragsmanagementprüfstand allein würde den Produktionsablauf folglich nur in geringem Umfang optimieren. Zweckmäßiger ist es, zusätzlich an denjenigen Einflußvariablen der Produktion Optimierungen vorzunehmen, welche von größerer Relevanz für die Qualität des Produktionsprozesses sind, ohne jedoch die Ansätze der beiden obigen Teilsysteme unausgenutzt zu lassen. Aus diesem Grund wurde für das Produktionsoptimierungssystem zusätzlich die **Auftragsterminierung** (zeitliche Planung der Fertigungsaufträge) miteinbezogen. Die Auftragsterminierung soll die Startzeiten von Fertigungsaufträgen und Arbeitsschritten so planen, daß Engpässe und damit **Liegezeiten** an den Arbeitssystemen reduziert werden. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich, ist die Beeinflussung der Liegezeiten von großer Relevanz, da sie typischerweise 85% der gesamten Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrags in Anspruch nimmt[90].

Abbildung 11 gibt die grundsätzliche Konzeption des Produktionsoptimierungssystems wieder.

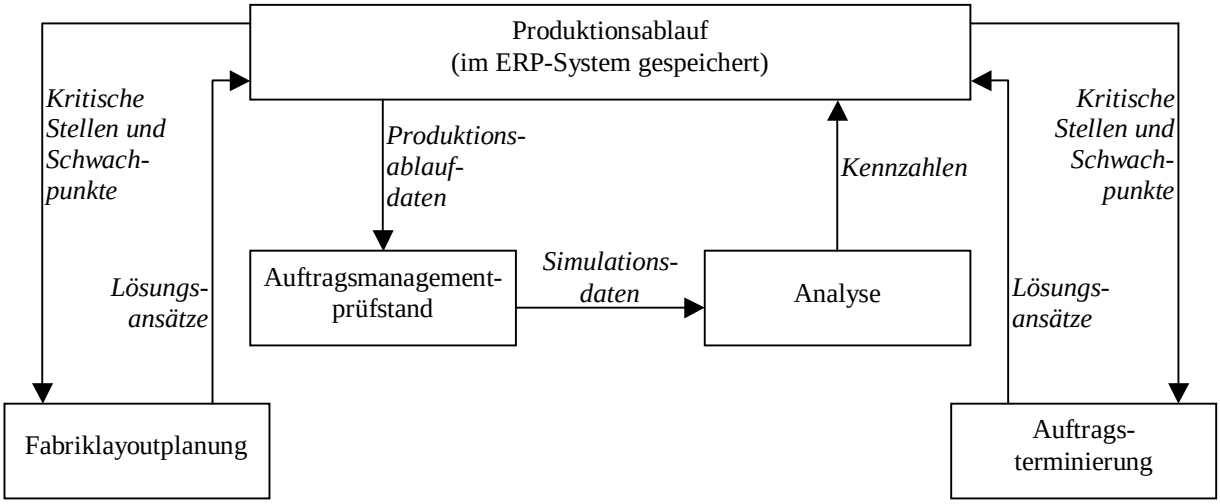

Abb. 11: Konzeption des Produktionsoptimierungssystems

[88] Vgl. Stommel (1976), S. 143
[89] Stand Mai 2001; der Einbau von Planungsfunktionalitäten in den Auftragsmanagementprüfstand wurde zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit diskutiert.
[90] Vgl. Stommel (1976), S. 143

3.3 Datenmodellierung

In diesem Abschnitt sollen auf Basis der Einflußvariablen der Produktion die vom Produktionsoptimierungssystem verwendeten Datenstrukturen eingeführt werden. Bei den folgenden Ausführungen gehen wir davon aus, daß die Daten an einer zentralen Stelle, z.B. innerhalb eines ERP-Systems, abgelegt werden. In diesem Abschnitt ist vor allem die Semantik der Daten von Interesse ist und nicht, wo und wie ihre Handhabung erfolgt, so daß dies keine Einschränkung bedeuten sollte. Als Darstellungsform werden Klassendiagramme der Unified Modeling Language (UML) verwendet (für eine Einführung in UML sowie weitere Informationen sei auf die entsprechende Literatur, z.B. das Standardwerk von Booch/Rumbaugh/Jacobson (1999), verwiesen).

Welche Daten werden nun zur Umsetzung der oben beschriebenen Abläufe benötigt?

Der erste Ansatzpunkt im Fall von BICC aus Abschnitt 3.1 lag in der **Neugestaltung der Anordnung aller Arbeitssysteme** innerhalb der Produktionsstätte. Es werden also einerseits Angaben hinsichtlich Bestand, Position und Ausdehnung von Arbeitssystemen benötigt.

↳ Klasse `Arbeitssystem`
beschreibt kleinste unabhängige Einheiten des Produktionsprozesses

Andererseits sind auch Angaben über die **Produktionsstätte** selbst nötig, um die Grenzen der Anordnungsmöglichkeiten zu bestimmen, also etwa Grundriß der Fabrik, das Vorhandensein etwaiger Stützpfeiler oder Zwischenwände mit Position und Ausdehnung, ferner Räume, in welchen keine Ressourcen angeordnet werden dürfen (Freiräume vor/hinter Türen, Belüftungseinrichtungen, Gänge etc.).

↳ Klasse `Produktionsstätte`
beschreibt die regionalen Gegebenheiten zur Anordnung von Ressourcen innerhalb der Fabrik

Der Produktionsprozeß ist die Folge zielgerichteter Verknüpfungen von Inputfaktoren zu Outputfaktoren an den einzelnen Arbeitssystemen[91]. Um ihn abbilden zu können, benötigt man zunächst eine Beschreibungsform für Input- und Outputfaktoren. Inputfaktoren sind alle zur Produktion eingesetzten Güter (vgl. Kapitel 2.1.4). Outputfaktoren sind im Rahmen dieser Arbeit **materielle** Produkte (vgl. Kapitel 2.1.3).

Bei der Modellierung der Input- und Outputfaktoren werden alle **stofflichen** Güter, unabhängig davon, ob sie Input- und/oder Outputfaktor sind, in einer gemeinsamen Repräsentationsform zusammengefaßt:

↳ Klasse `Produkt`
beschreibt materielle Input- und Outputfaktoren

[91] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 119ff.

Die menschliche Arbeitsleistung ist für den Produktionsoptimierungsprozeß nur diesbezüglich ein deterministischer Faktor, als daß sie Einfluß auf die Zeitdauer ausübt, in welcher an den Produktionsmitteln produziert wird. Sie wird im Rahmen eines **Schichtmodells** abgebildet. In diesem werden alle Zeiten festgehalten, während derer ein Arbeitssystem zur Produktion zur Verfügung steht:

- Klasse `Schicht`
  beschreibt Einsatzzeiten von Arbeitssystemen

Zusatzfaktoren (etwa Prüfungs- und Beratungsleistungen Dritter[92]) und Information als weitere Inputfaktoren werden bei der Modellierung des Produktionsprozesses im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Der eigentliche Produktionsprozeß (Wertschöpfung des Unternehmens) wird über die zu erzeugenden **Endprodukte** definiert. Hierzu muß als erstes eine Repräsentation für **Fertigungsaufträge** eingeführt werden. **Arbeitspläne** erhalten Arbeitsanweisungen für die Herstellung bestimmter Mengen von Enderzeugnissen. Arbeitsanweisungen sind an dieser Stelle Folgen von **Arbeitsschritten**, in welchen an den einzelnen Arbeitssystemen die Kombination von Input- zu Outputfaktoren erfolgt (also z.B. das Ausstanzen bestimmter Teile aus Metallblechen).

- Klasse `Fertigungsauftrag`
  beschreibt Arbeitsanweisungen zur Herstellung bestimmter Enderzeugnismengen

- Klasse `Arbeitsschritt`
  beschreibt die Kombination von Input- zu Outputfaktoren an einem einzelnen Arbeitssystem

In den folgenden Abschnitten werden die eingeführten Klassen und ihre Attribute vorgestellt. Die Wahl der einzelnen Attribute geschah nicht willkürlich, sondern im Hinblick auf ein möglichst einfaches Zusammenspiel mit den in Kapitel 2 vorgestellten Teilsystemen des Sonderforschungsbereichs SFB 467. Von den Methoden der Klassen wird an dieser Stelle abstrahiert.

3.3.1 Die Klasse `Arbeitssystem` *(vgl. Abb. 12)*

Wie bereits ausgeführt, repräsentiert diese Klasse ein einzelnes Arbeitssystem.

Die Attribute `bereich`, `kostenstelle` und `maschinengruppe` sind zu Verwaltungszwecken durch den Anwender vorgesehen.

`bezeichnung` enthält den Namen des Arbeitssystems in lesbarer Form.

`kategorie` gibt einen Verweis auf den Typ des Arbeitssystems.

`schichtmodell` enthält einen Verweis auf das Schichtmodell, nach welchem an diesem Arbeitssystem produziert wird (Laufzeit in Stunden pro Tag etc. – vgl. Abschnitt 3.3.4).

[92] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 118

Arbeitssystem	
bereich	:string
kostenstelle	:string
maschinenGruppe	:string
bezeichnung	:string
kategorie	:string
schichtmodell	:Schicht
personalBedarf	:real
auftragsBelastungsSchranke	:integer
stundenBelastungsSchranke	:real
position	:Position
ausdehnung	:Region
fix	:boolean

Abb. 12: Die Klasse `Arbeitssystem`

`personalBedarf` gibt an, wie viele Personen nötig sind, um das Arbeitssystem zu bedienen. Bruchzahlen sind zugelassen, falls eine Arbeitskraft zur Bedienung mehrerer Arbeitssysteme abgestellt ist.

`auftragsBelastungsSchranke` und `stundenBelastungsSchranke` stellen Beschränkungen dar, ab Erreichen welcher keine weiteren Aufträge vor dem Arbeitssystem eingelastet werden. Ist die Auftragsbelastungsschranke beispielsweise auf den Wert fünf eingestellt, so werden vom betreffenden System keine weiteren Aufträge angenommen, sobald sich in der Warteschlange vor ihm fünf Aufträge befinden. Die Stundenbelastungsschranke ist analog zu verstehen, sie gibt den Arbeitsinhalt in Stunden an, ab welchem keine weiteren Aufträge an der Maschine eingelastet werden.

`position` gibt die Positionierung des Arbeitssystems innerhalb der Produktionsstätte an.

`ausdehnung` enthält eine geometrische Beschreibung des Arbeitssystems hinsichtlich Größe, Platzbedarf etc.

`fix` gibt an, ob es sich um ein prinzipiell verschiebbares Arbeitssystem handelt. Manche Arbeitssysteme sind fix an einen bestimmten Aufstellungsort gebunden, da sie z.B. mittels eines speziellen Fundaments gegen das Auftreten von Vibration geschützt werden müssen. Solche Arbeitssysteme dürfen im Rahmen der Layoutplanung natürlich nicht umpositioniert werden.

3.3.2 Die Klasse `Produktionsstätte` *(vgl. Abb. 13)*

Diese Klasse dient zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften einer Produktionsstätte.

Produktionsstätte

bezeichnung	:string
ausdehnung	:Region
verboten	:list of Region

Abb. 13: Die Klasse `Produktionsstätte`

`bezeichnung` gibt den Namen der Produktionsstätte in lesbarer Form wieder (z.B. „Werk 23“).

`ausdehnung` enthält die Beschreibung der Grundfläche der Produktionsstätte.

`verboten` enthält eine Liste von Gebieten innerhalb der Produktionsstätte, in welchen keine Arbeitssysteme positioniert werden dürfen. Der mögliche Positionierungsraum ergibt sich also aus der Region `ausdehnung`, subtrahiert um alle Regionen aus der Liste `verboten`.

3.3.3 Die Klasse `Produkt` *(vgl. Abb. 14)*

Diese Klasse dient zur Beschreibung eines materiellen Sachgutes der Produktion (Rohstoffe, Zwischen- und Enderzeugnisse, auch Hilfs- und Betriebsstoffe, soweit deren Abbildung notwendig erscheint). Es wird nicht zwischen Input- und Outputfaktoren unterschieden.

Produkt	
bezeichnung	:string
mengenEinheit	:string

Abb. 14: Die Klasse `Produkt`

`bezeichnung` enthält den Namen des Sachgutes in lesbarer Form.

`mengenEinheit` gibt die Einheit an, in welcher Bestände des betreffenden Sachgutes gemessen werden, also z.B. „Stück“, „Hektoliter“ etc.

3.3.4 Die Klasse `Schicht`[93] *(vgl. Abb. 15)*

Mit Hilfe dieser Klasse werden Arbeits- und Einsatzzeiten eines Arbeitssystems charakterisiert.

Schicht

[93] Das verwendete Schichtmodell wurde von Herrn Dipl-Ing. Benno Löffler (Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs 467 am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung) eingeführt

bezeichnung	:string
sequenz	:list of Woche
arbeitsfrei	:list of Tag

Abb. 15: Die Klasse `Schicht`

`bezeichnung` enthält den Namen der betreffenden Schicht in lesbarer Form.

`sequenz` gibt eine Liste von Wochen mit Arbeitszeitangaben an (s.u.).

`arbeitsfrei` enthält eine Liste von Tagen, an denen das Arbeitssystem nicht zur Produktion zur Verfügung steht, also z.B. alle Feiertage.

Wochen fassen die Arbeitszeit von genau sieben Tagen zusammen:

Woche	
wochenTag [7]	:array of Tag

Abb. 16: Die Klasse `Woche`

Tage bestehen aus einzelnen Zeitperioden, in welchen produziert wird.

Tag	
arbeitsZeit	:list of Intervall

Abb. 17: Die Klasse `Tag`

Zeitperioden schließlich sind durch jeweils einen eindeutigen Start- und Endzeitzeitpunkt definiert:

Intervall	
startUhrzeit	:Uhrzeit
endUhrzeit	:Uhrzeit

Abb. 18: Die Klasse `Intervall`

3.3.5 Die Klasse `Fertigungsauftrag` *(vgl. Abb. 19)*

Fertigungsaufträge enthalten eine Menge von Arbeitsschritten, die zur Herstellung einer bestimmten Menge eines Enderzeugnisses notwendig sind.

`bezeichnung` enthält einen Namen für den betreffenden Auftrag in lesbarer Form (z.B. „Herstellung Verlängerungsteile A5 für Kunde Meier“).

`auftragsNummer` gibt die eindeutige Nummer des Fertigungsauftrags an. Über sie wird der Fertigungsauftrag im folgenden identifiziert.

Fertigungsauftrag	
bezeichnung	:string
auftragsNummer	:integer
prioritaet	:integer
menge	:real
produkt	:Produkt
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum

Abb. 19: Die Klasse `Fertigungsauftrag`

`prioritaet` weist dem Fertigungsauftrag eine Dringlichkeitsstufe zu. Hierbei ist Priorität 0 gleichbedeutend mit normaler Dringlichkeit, Prioritätsstufe 1 ≡ dringlicher als Priorität 0, Prioritätsstufe 2 ≡ dringlicher als Priorität 1 usw.

`menge` gibt an, wie viele Einheiten des Endproduktes *Produkt* herzustellen sind (die Maßeinheit ist durch die Klasse Produkt festgelegt).

`sollStart` und `sollEnde` geben die geplanten Start- und Endzeitpunkte zur Durchführung des Fertigungsauftrags an, wie sie sich nach Einsatz der betreffenden PPS-Methode ergeben.

3.3.6 Die Klasse `Arbeitsschritt` *(vgl. Abb. 20)*

Ein Arbeitsschritt charakterisiert die Kombination von Inputfaktoren zu Outputfaktoren an einem einzelnen Arbeitssystem.

`auftrag` verweist auf den betreffenden Fertigungsauftrag, in dessen Rahmen der Arbeitsschritt abläuft.

`arbeitsSchrittNummer` gibt die innerhalb des Fertigungsauftrags eindeutige Nummer des Arbeitsschritts an.

`vorherigeSchritte` enthält die Liste von Arbeitsschritten (genauer: ihre Nummern), welche gemäß des Arbeitsplans direkte Vorgänger des Arbeitsschritts sind (vgl. auch Netzplantechnik, Kapitel 4.7).

Arbeitsschritt	
auftrag	:Auftrag
arbeitsSchrittNummer	:integer
vorherigeSchritte	:list of integer
menge	:real
produkt	:Produkt
arbeitssystem	:Arbeits-system
ruestZeit	:Zeit-dauer
prozessZeit	:Zeit-dauer
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum
fahrplan	:Fahrplan

Abb. 20: Die Klasse `Arbeitsschritt`

`menge` und `produkt` geben an, wieviel Einheiten des Zwischen- oder Endprodukts in diesem Arbeitsschritt auf der Maschine `arbeitssystem` herzustellen sind.

`ruestzeit` enthält die Zeitspanne, die vor Aufnahme der Produktionstätigkeit am Arbeitssystem notwendig ist, um die erforderlichen Einstellungen zu treffen etc.

`prozesszeit` ist die benötigte Bearbeitungsdauer des Arbeitsschritts.

`sollStart` und `sollEnde` geben wieder die geplanten Start- und Endzeitpunkte zur Durchführung des Arbeitsschritts an.

`fahrplan` enthält Angaben darüber, in welchem Zeitbereich innerhalb der Schicht des referierten Arbeitssystems der Arbeitsschritt ausgeführt werden muß, falls eine solche Angabe aus produktionstechnischen Gründen notwendig ist.

3.3.7 Weitere Klassen

Bei der Modellierung der oben aufgeführten Klassen werden folgende nicht-Standard-Datentypen benötigt:

- `Position`: Zur Festlegung des Standortes eines Arbeitssystems

Position	
x	:real
y	:real
z	:real

Abb. 21: Die Klasse `Position`

- `Region`: Zur Definition von Ausdehnungen von räumlichen Objekten

Region	
zentrum	:Position
waende	:list of Flaeche

Abb. 22: Die Klasse `Region`

`zentrum` gibt hierbei den Bezugspunkt an, auf den sich alle weiteren Angaben des Objekts beziehen.

`waende` ist eine Liste von Oberflächen, welche die Ausdehnung des Objekts charakterisieren. `flächen` werden durch ihre Eckpunkte im Raum definiert.

Flaeche	
eckpunkte	:list of Position

Abb. 23: Die Klasse `Flaeche`

- `Datum`: Zur Festsetzung von Start- und Endzeitpunkten

Datum	
woche	:integer
tag	:integer
stunde	:integer
minute	:integer
sekunde	:integer

Abb. 24: Die Klasse `Datum`

- `Zeitdauer`: Zur Bestimmung von Rüst- und Prozeßzeiten

Zeitdauer	
tage	:integer
stunden	:integer
minuten	:integer
sekunden	:integer

Abb. 25: Die Klasse `Zeitdauer`

3.3.8 Abgeleitete Daten

Aus den in den vorherigen Abschnitten definierten Daten können zwei weitere Klassen abgeleitet werden, welche Informationen, die ansonsten in verstreuter Form vorliegen würden, zusammenfassen.

Dies ist zum einen die Klasse `Transportmatrix`. Sie hat folgenden Aufbau (`n` sei die Anzahl der Arbeitssysteme):

`Transportmatrix`
`transportZeit [n][n] :array of array of Zeitdauer`

Abb. 26: Die Klasse `Transportmatrix`

Eine Transportmatrix enthält für je zwei verschiedene Arbeitssysteme A_1 und A_2 die Zeitdauer t, welche für den Transport von Produktionsgütern von A_1 nach A_2 benötigt wird. Sie ist nach (Neu-) Anordnung der Arbeitssysteme neu zu bestimmen.

Die zweite Klasse betrifft die Materialmengen, welche zwischen den Arbeitssystemen im Rahmen der Fertigungsaufträge bewegt werden. Diese Informationen werden in der `Materialflußmatrix` abgelegt (`n` sei wieder die Anzahl der Arbeitssysteme):

`Materialflußmatrix`
`materialFluss [n][n] :array of array of real`

Abb. 27: Die Klasse `Materialflußmatrix`

Der Materialfluß gibt für je zwei verschiedene Arbeitssysteme A_1 und A_2 die Mengen an Materialien an, welche zwischen diesen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls bewegt werden. Auf diese Weise lassen sich später besonders transportintensive Bewegungsrichtungen identifizieren, welche bei der Positionierung von Arbeitssystemen durch das Fabriklayoutplanungsmodul in Betracht gezogen werden müssen.

Die Ausführungen zur weiteren Ausgestaltung des Produktionsoptimierungssystems stützen sich auf die in diesem Kapitel eingeführten Datenklassen und Attribute. Die obige Modellierung versteht sich dabei als konzeptioneller Ansatz, der bei Realisierung des Produktionsoptimierungssystems speziell auch hinsichtlich des im betrachteten Unternehmen verwendeten Datenmodells abzugleichen ist. Dem Verfasser ging es darum, eine möglichst präzise Sammlung aller relevanten Informationen aufzustellen, so daß in der obigen Modellierung auch Attribute vertreten sind, die vom Produktionsoptimierungssystem nicht direkt ausgewertet, sondern zwischen den Teilsystemen ausgetauscht bzw. dort lokal verwendet werden.

4. Der Produktionsoptimierungsprozeß

4.1 Grundsätzlicher Ablauf und Vorphase

Zur Darstellung von Prozeßabläufen wird in dieser Arbeit die von Stahlknecht/Hasenkamp (1997) eingeführte Methodik der **ereignisgesteuerten Prozeßketten**[94] verwendet. Es handelt sich hierbei um gerichtete Graphen, bei denen die Knoten **Funktionen** (dargestellt durch abgerundete Rechtecke), **Ereignisse/Zustände** (dargestellt durch Sechsecke) oder **Verknüpfungs-operatoren** (dargestellt durch Kreise) beschreiben. Funktionen und Ereignisse folgen immer **abwechselnd** aufeinander, Funktionen werden von einem oder mehreren Ereignissen ausgelöst und erzeugen ein oder mehrere Ereignisse.

Der Produktionsoptimierungsprozeß wird zunächst in **zwei Phasen** untergliedert:

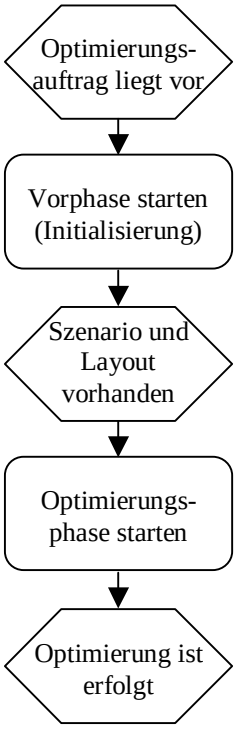

Abb. 28: Phasengliederung des Produktionsoptimierungsprozesses

Die **Vorphase** stellt sicher, daß alle Daten, welche im folgenden zur Optimierung benötigt werden, vorhanden sind. Konkret muß zum einen überprüft werden, ob alle Angaben hinsichtlich Arbeitssysteme, Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Schichten etc. vollständig vorliegen. Diese Daten seien im folgenden unter dem Begriff **Szenario** zusammengefaßt (ein Szenario beschreibt *einen* Produktionsablauf). Zum anderen muß zumindest ein erster Layoutentwurf erfolgt sein, so daß daraus Transportwege und -zeiten bestimmbar sind (dies muß nicht bei jeder Neuinstanz des Optimierungsprozesses geschehen; es muß lediglich sichergestellt sein, daß

[94] Vgl. Stahlknecht/Hasenkamp (1997), S. 277f.

überhaupt Angaben über die Positionierung der Arbeitssysteme vorhanden sind). Abbildung 29 gibt einen Überblick über die Tätigkeiten der Vorphase.

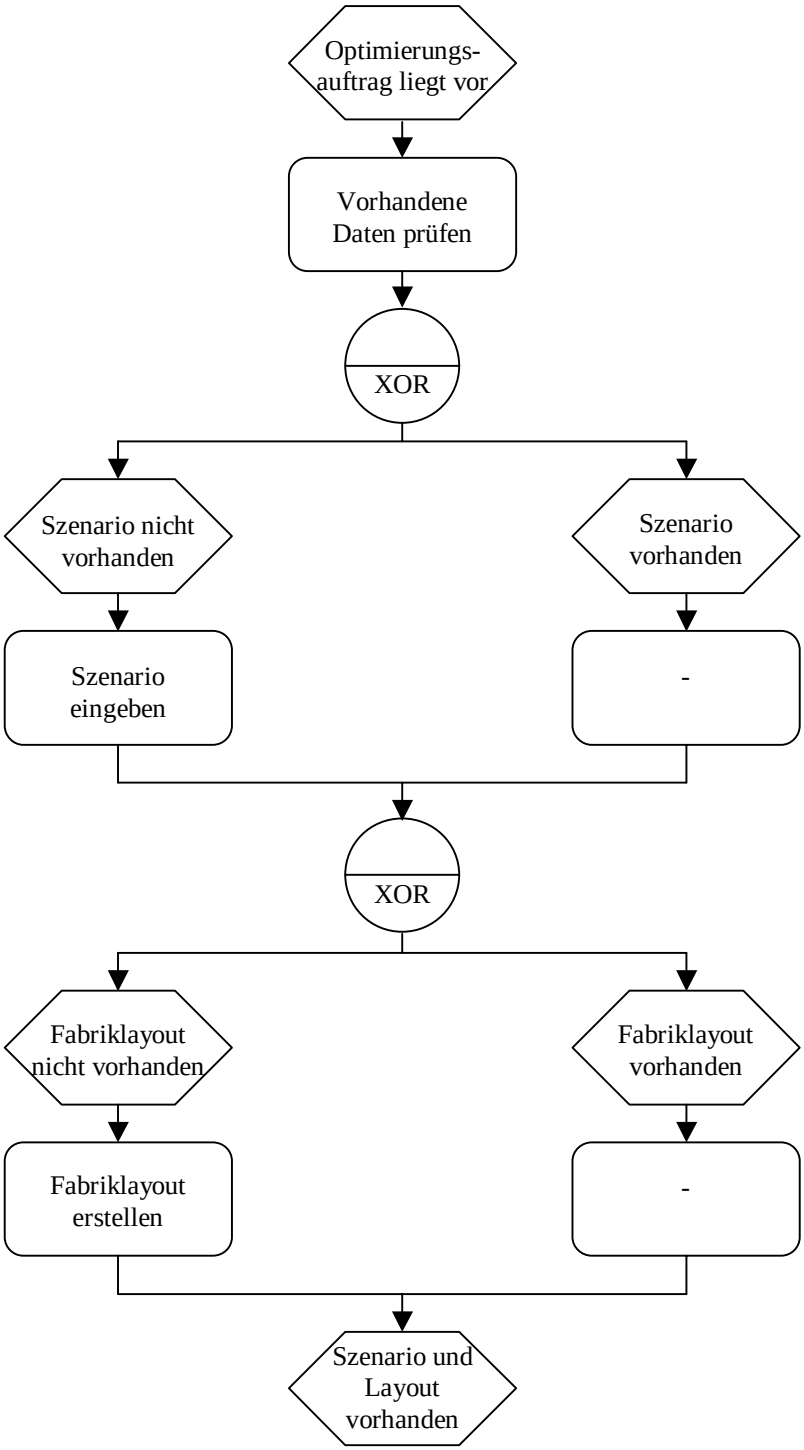

Abb. 29: Die Vorphase des Produktionsoptimierungsprozesses

Aufgabe der Optimierungsphase ist, durch iterative Ansteuerung der eingebundenen Teilsysteme die eigentliche Optimierung des Produktionsablaufs zu erzielen.

4.2 Optimierungsphase

Innerhalb der Optimierungsphase werden die Teilsysteme **Fabriklayoutplanung** (vgl. Kapitel 2.2), **Auftragsmanagementprüfstand** (vgl. Kapitel 2.3) und **Auftragsterminierung** (vgl. Abschnitt 4.7) vom Optimierungssystem angesteuert und ihre Teilergebnisse miteinander zu einem globalen Optimum verknüpft.

Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise soll an dieser Stelle eine kurze Definition gegeben werden, was im Rahmen dieser Arbeit unter Optimierung zu verstehen ist und wie sie grundsätzlich durchgeführt werden soll.

Wie in Kapitel 3 dargestellt, basiert die Modellierung eines Produktionsablaufs auf der Einführung verschiedener Daten bzw. Klassen, die alle relevanten Aspekte widerspiegeln sollen. Eine konkreter **Produktionsablauf** ist durch die **Menge von Werten** bestimmt, welche die zur Modellierung herangezogenen Daten in seinem Fall annehmen. Zur Bestimmung dessen, wann ein Produktionsablauf A besser als ein Produktionsablauf B ist, werden **Kennzahlen** generiert, die sich aus den Werten der Modelldaten ableiten lassen. Bei den Kennzahlen handelt sich um **verdichtete Informationen**. Die Bewertung zweier unterschiedlicher Produktionsabläufe erfolgt dann durch den Vergleich ihrer jeweiligen Kennzahlen. Dabei ist zu beachten, daß es sich hierbei um ein **komplexes Vergleichsverfahren** handelt. Es ist offensichtlich, daß ein Produktionsablauf A, dessen Kennzahlen allesamt „besser“ sind als die eines Produktionsablaufs B, der bessere der beiden ist. Wie stellt sich dies aber dar, wenn ein Teil der Kennzahlen von A gegenüber den jeweiligen Gegenstücken in B besser ist, ein Teil jedoch schlechter? Ausgehend von dieser Fragestellung ist ein geeignetes Bewertungsverfahren im Rahmen der Optimierung zu entwickeln (vgl. Abschnitt 4.6).

Optimierung bedeutet nun, daß, ausgehend von einer vorgegebenen Ausgangslage, durch die Variation von Datenwerten Produktionsabläufe gesucht werden, welche gegenüber den bisher bekannten eine Verbesserung darstellen. Dabei läßt sich das Optimierungsproblem als **Suchproblem** charakterisieren: Aus einer Vielzahl möglicher Lösungen (Produktionsabläufe) muß durch zielgerichtete **Suche** eine Lösung gefunden werden, welche den spezifizierten Anforderungen genügt[95].

Die Lösung eines solchen Suchproblems erfordert folgende Vorgehensweise:

1. Definition eines **Zustandsraums**, der alle möglichen Konfigurationen der relevanten Objekte enthält;
2. Spezifikation des **Ausgangszustands** (*initial state*);
3. Spezifikation der **Zielzustände** (*goal states*);
4. Spezifikation von **Regeln**, die die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur **Navigation** innerhalb des Zustandsraums beschreiben[96].

[95] Vgl. Dean/Allen/Aloimonos (1995), S. 131
[96] Vgl. Rich/Knight (1991), S. 35

Das Suchproblem kann dann gelöst werden, indem man sich durch Anwendung der spezifizierten Regeln in Kombination mit einer geeigneten Kontrollstrategie, ausgehend vom Anfangszustand, durch den Zustandsraum bewegt, bis ein Zielzustand gefunden wurde[97].

4.2.1 Definition des Zustandsraums

Der **Zustandsraum** (auch: **Suchraum**) definiert die Menge der **Objekte**, in welcher die Suche erfolgen soll. Die Objekte des Suchraums stehen dabei untereinander durch **Operatoren** in Beziehung, durch Anwendung welcher ein Objekt des Suchraums in ein anderes transferiert wird[98].

Die **Objekte** des Suchraums im vorliegenden Fall sind, wie bereits dargelegt, einzelne Produktionsabläufe. Sie werden über die Menge von Werten charakterisiert, die die bei der Modellierung verwendeten Daten annehmen. Es stellt sich die Frage, welche der in Kapitel 3 eingeführten Daten **innerhalb** des Produktionsoptimierungsprozesses als variabel, welche als konstant angesehen werden sollen.

Die **Produktionsstätte** mit ihren räumlichen Gegebenheiten wird als **unveränderlich** angesehen - der Produktionsoptimierungsprozeß zielt auf die Wandlungsfähigkeit des Unternehmens ab, d.h. auf die Fähigkeit, sich auch kurzfristig an veränderte Umstände anzupassen; räumliche (Um-)Baumaßnahmen sind sowohl vom Zeitraum als auch von den damit verbundenen Ausgaben her als langfristige, sich selten wiederholende Maßnahme anzusehen.

Die Zusammensetzung der vorhandenen Arbeitssysteme (=**Ressourcenstruktur**) wird als **variabel** betrachtet. Beispielsweise soll auch simuliert werden können, inwiefern der Ersatz eines Arbeitssystems, das einen Engpaß darstellt, durch ein solches mit höherer Kapazität lohnenswert ist. Ebenso variabel ist der **Aufstellungsort der Arbeitssysteme** (soweit je nach Arbeitssystem möglich) als notwendige Bedingung für den Einsatz von Fabriklayouttechniken.

Input- und Outputfaktoren, also Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte, sollen sich in ihrer Struktur während der Optimierungsphase nicht verändern, d.h. sind **konstant**. Ebenso werden Arbeits- und Maschinenlaufzeiten (**Arbeitsschichten**) als unveränderlich angesehen.

Einzelne **Arbeitsschritte** sollen insofern **variabel** sein, als daß ihre Terminierung (wann soll der betreffende Arbeitsschritt ausgeführt werden?) vom Produktionsoptimierungsprozeß verändert werden darf. Der Inhalt der Arbeitsschritte bezüglich Angaben über herzustellende Produkte etc. bleibt dagegen unverändert. **Fertigungsaufträge** werden analog behandelt: Ihre zeitliche Umplanung soll in gewissen Grenzen erlaubt sein, alles andere bleibt fix.

Zusammenfassend ergibt sich folgende Liste an ***veränderlichen*** Daten:

- Ressourcenstruktur,
- Positionen von Arbeitssystemen,

[97] Vgl. Rich/Knight (1991), S. 35
[98] Vgl. Dean/Allen/Aloimonos (1995), S.134

- Startzeitpunkte von Fertigungsaufträgen und Arbeitsschritten.

Zu beachten ist, daß die Variation der innerhalb des Produktionsoptimierungsprozesses fixen Daten „von außen“ möglich und im Rahmen der Anwendung (vgl. Kapitel 6) **erwünscht** ist. Der Produktionsoptimierungsprozeß wird dann mit unterschiedlichen Ausgangsdaten angestoßen. Auf diese Weise sind **Quervergleiche zwischen verschiedenen Szenarien** der Produktion möglich.

Die Transformation eines Objekts (eines Produktionsablaufs) in ein anderes Objekt innerhalb des Suchraums erfolgt durch die Anwendung von **Transformationsoperatoren**. Faßt man die Variation von Struktur und Aufstellungsort von Arbeitssystemen zu einer Aufgabe zusammen, die vom Fabriklayoutplanungssystem erfüllt wird[99], so ergeben sich folgende Operatoren, die im folgenden als **Optimierungsschritte** bezeichnet werden sollen:

- Veränderung von Struktur und Aufstellungsorten der Arbeitssysteme (→Fabriklayoutplanung);
- Veränderung der zeitlichen Einplanung von Fertigungsaufträgen und Arbeitsschritten (→Auftragsterminierung).

Im folgenden sei die Anwendung des Fabriklayoutmoduls mit **Optimierungsschritt OS_1** und die Anwendung der Auftragsterminierung mit **OS_2** bezeichnet:

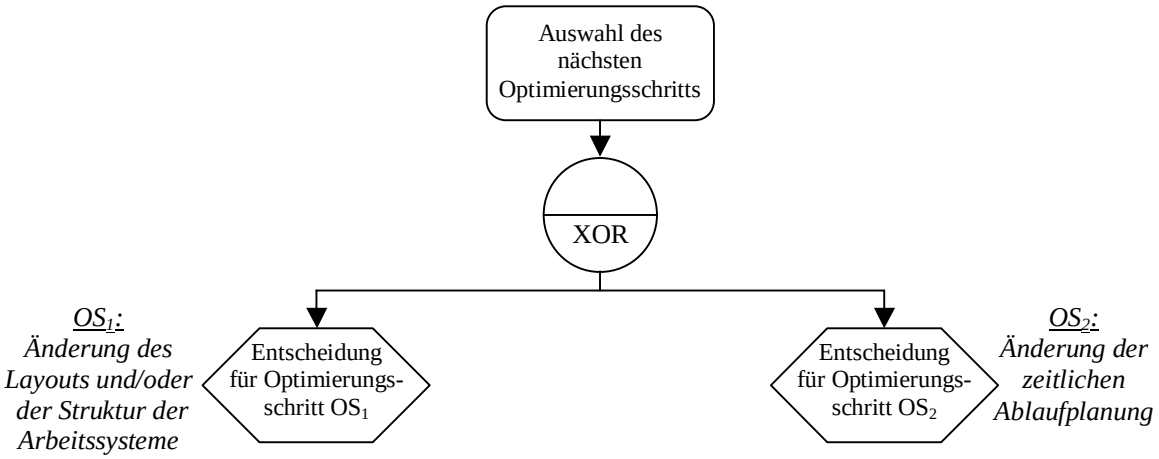

Abb. 30: Optimierungsschritte

Prinzipiell ist die Anwendung jedes Optimierungsschritts auf jeden Produktionsablauf möglich. Es ergibt sich damit folgender Zustandsraum, wie er in Abbildung 31 in Form eines Binärbaums wiedergegeben ist (A, B_i, C_j, ... seien dabei Produktionsabläufe):

[99] Die Aufnahme der Funktionalität einer Veränderung der Arbeitssystemestruktur im Rahmen der Fabriklayoutplanung war zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit (Stand Juni 2001) von den Verantwortlichen des Teilprojekts B2 fest eingeplant und wurde deshalb auf diese Weise integriert.

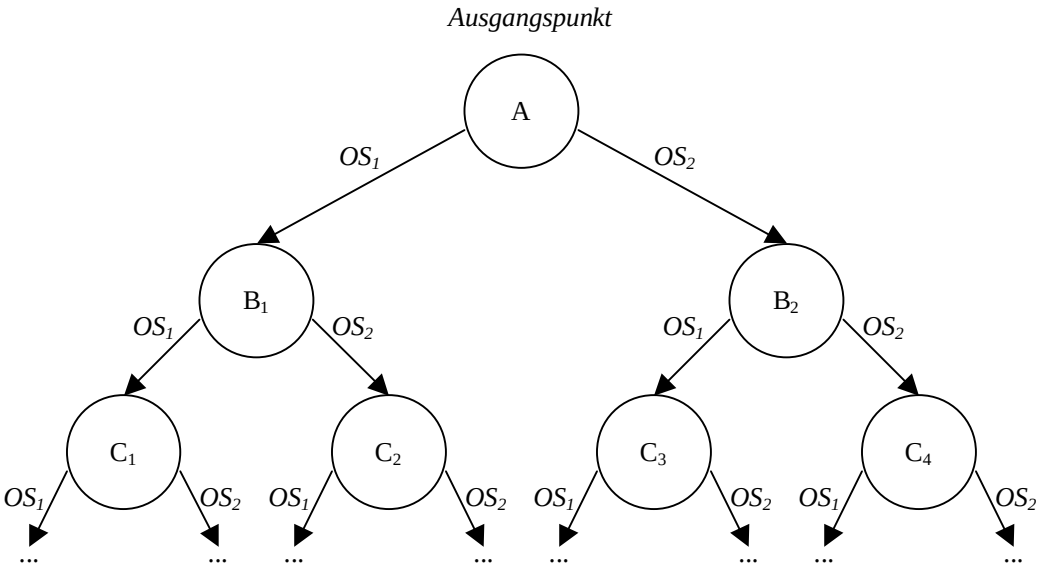

Abb. 31: Suchraum in Form eines Binärbaums

4.2.2 Spezifikation des Ausgangszustands

Der Ausgangszustand wird vom Produktionsoptimierungsprozeß als Eingabedatum erwartet. Es handelt sich um den **nicht-optimierten Produktionsablauf**, wie er sich ausgehend von der Produktionsplanung ergibt.

4.2.3 Spezifikation des Zielzustände

Zielzustände zeichnen sich dadurch aus, daß vom aktuell betrachteten Objekt ein bestimmtes **Optimalitätskriterium** erfüllt wird. Dies geschieht im Rahmen des Produktionsoptimierungsprozesses in der Weise, daß Kennzahlen abgeleitet und betrachtet werden, welche bestimmte, noch festzulegende Aspekte eines Produktionsablaufs beschreiben. Die Generierung der Kennzahlen basiert auf den Simulationsdaten, wie sie vom Auftragsmanagementprüfstand erzeugt werden. Aus diesem Grund wird der Auftragsmanagementprüfstand direkt im Anschluß an jeden Optimierungsschritt (Aufruf an ein Teilmodul Fabriklayoutplanung oder Auftragsterminierung) ausgeführt und seine Ergebnisse bei der Generierung der Kennzahlen ausgewertet. Auf diese Weise gehen auch keine Informationen bezüglich berechneter, aber nicht analysierter Produktionsabläufe verloren.

Da die Ausführungen zur Ableitung der Kennzahlen sowie zum eigentlichen Optimalitätskriterium von umfangreicher Natur sind, wurden sie aus Gründen der Übersichtlichkeit in die Abschnitte 4.5 (Ableitung der Kennzahlen) und 4.6 (Optimalitätsbestimmung) ausgegliedert.

4.2.4 Festlegen der Navigationsmöglichkeiten

Navigation bedeutet, daß ausgehend vom aktuellen Objekt (Produktionsablauf) entweder Optimierungsschritt OS_1 oder OS_2 angewendet wird. Gängige Ansätze zum Durchlaufen des Suchraums wie Tiefen- und Breitensuche[100] sind für den

[100] Vgl. Dean/Allen/Aloimonos. S. 138ff.

Produktionsoptimierungsprozeß ungeeignet, da sie zum einen die semantischen Aspekte der beiden Optimierungsschritte nicht berücksichtigen, zum anderen wächst die Zahl der im Speicher zu haltenden Objekte bei beiden Verfahren mit der Zeit beträchtlich an[101]. Da die Suchobjekte bei komplexen Produktionsabläufen sehr umfangreich werden können, ist der mit einer solchen Suchstrategie verbundene Speicherbedarf unverhältnismäßig groß.

Aus diesem Grund soll im folgenden Abschnitt eine **Optimierungsstrategie** entwickelt werden, die entscheidet, wann innerhalb des Suchraums welcher Optimierungsschritt anzuwenden ist. Zuvor gibt Abbildung 32 noch einen Überblick über den grundsätzlichen Ablauf der Optimierungsphase, wie er sich aus den obigen Ausführungen ergeben hat.

4.3 Optimierungsstrategie

Wie bereits ausgeführt, sind zu Beginn jeder Iteration innerhalb der Optimierungsphase zwei unterschiedliche Fortführungsweisen möglich. Bei der Auswahl des nächsten durchzuführenden Optimierungsschritts sollen die semantischen Aspekte der jeweiligen Operation miteinbezogen werden. Dazu seien zunächst die **Optimierungspotentiale** innerhalb jedes Optimierungsschrittes sowie die **Auswirkungen** auf den jeweils anderen betrachtet:

a) Veränderung von Layout und/oder Struktur der Arbeitssysteme (OS_1)

- Arbeitssysteme werden umpositioniert, so daß sich die Transportwegzeiten untereinander verändern;
- Zusammenfassen von Arbeitssystemen, um so Liegezeiten zu verkürzen.

Beides hat Auswirkungen auf die Terminierung der Fertigungsaufträge (durch verkürzte Transportzeiten und durch Veränderung der Struktur der Arbeitssysteme). Die zyklische Wiederholung allein dieses Optimierungsschritts ist sinnvoll, wenn nach der Restrukturierung der Struktur der Arbeitssysteme eine Neuevaluierung über weiterhin vorhandene oder neu hinzugekommene Engpässe erfolgt, so daß diese in der nächsten Iteration behandelt werden können.

b) Veränderung der Terminierung von Fertigungsaufträgen / Arbeitsschritten (OS_2)

Startzeitpunkte von Arbeitsschritten werden verändert, um Engpässe im Produktionsablauf abzuschwächen.

Dies hat Auswirkungen auf die Materialflüsse, die zwischen den Arbeitssystemen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls bewegt werden, und somit auf die Positionierungsplanung. Die Arbeitssystemestruktur wird hingegen nicht beeinflußt. Die zyklische Wiederholung dieses Optimierungsschritts ist sinnvoll, solange Engpässe vorhanden sind, die durch Verändern der zeitlichen Planung von Arbeitsschritten umgangen werden können.

[101] Vgl. Dean/Allen/Aloimonos. S. 138ff.

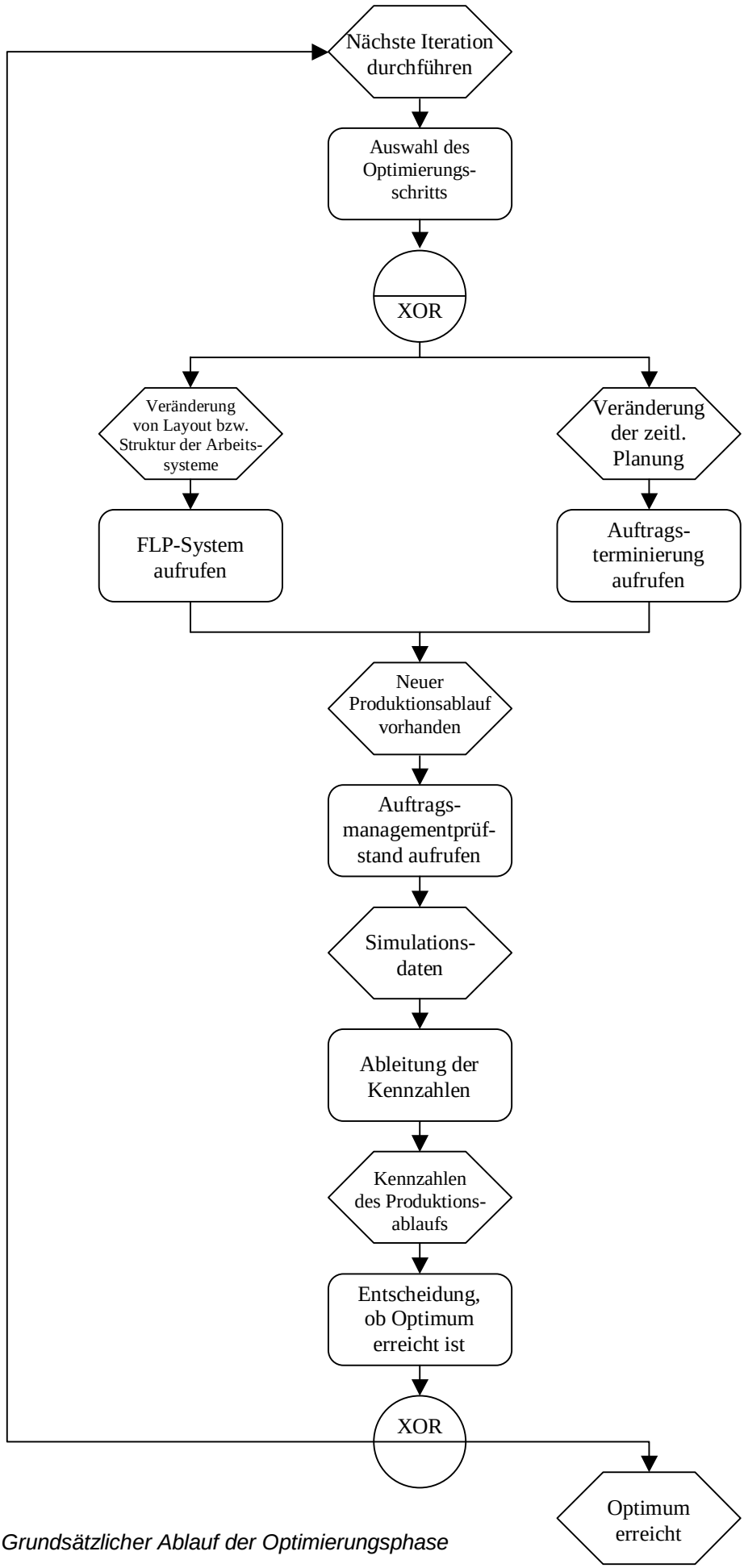

Abb. 32: Grundsätzlicher Ablauf der Optimierungsphase

Man erkennt, daß das Optimierungsproblem von stark wechselseitiger Natur ist, d.h. aufgrund des eben dargelegten keine unmittelbare Einschränkung des Suchraums ableitbar ist. Es sei daher auf einen zweiten Ansatz zurückgegriffen, nämlich die Fragestellung, wie **umfangreich** eine Änderung innerhalb jedes Optimierungsschrittes ist.

a) Veränderung von Ressourcenstruktur und Aufstellungsorten (OS_1)

Die Variation der Positionierung der Arbeitssysteme verändert die Transportzeiten zwischen den einzelnen Arbeitssystemen. Allerdings sind die durch eine bloße Neuberechnung des **Layouts** möglichen Gewinne vor allem bezüglich der Durchlaufzeit als gering einzustufen (vgl. Abschnitt 2.1.6). Eine Änderung der **Arbeitssystemestruktur** hingegen hat Auswirkungen auf alle Fertigungsaufträge, welche die betroffenen Arbeitssysteme durchlaufen. Es handelt sich um eine **revolutionäre** Änderung des Produktionablaufs mit potentiell weitreichenden Folgen.

b) Veränderung der Terminierung von Fertigungsaufträgen und Arbeitsgängen (OS_2)

Die Umstellung von Startzeitpunkten für Arbeitsschritte ist eine **lokale** Veränderung. Solange die Wahl des neuen Startzeitpunkts in behutsamer Weise geschieht, kann der Wirkungsbereich der Folgen des Optimierungsschritts überschaubar gehalten werden. Der Optimierungsschritt hat einen eher **evolutionären** Charakter und bietet sich für die iterative Wiederholung an.

Abbildung 33 zeigt die nichtdeterministische Struktur des Ablaufs der Optimierung einschließlich der soeben gewonnen Erkenntnisse auf:

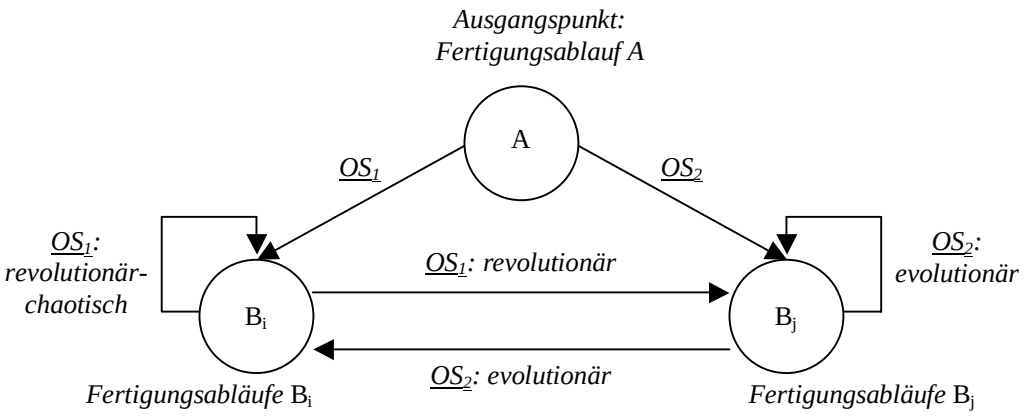

Abb. 33: nichtdeterministischer Ablauf der Optimierung

Basierend vom Ausgangspunkt ist die Wahl von Optimierungsschritt OS_1 oder OS_2 möglich. Die einmalige Anwendung von Optimierungsschritt OS_1 ist als revolutionärer Eingriff in den Produktionsablauf zu beurteilen. Die zyklische Wiederholung von Optimierungsschritt OS_1 hingegen kann aufgrund der potentiell hohen Anzahl der Verflechtungen[102] zu einem chaotischen Ergebnis führen. Die Anwendung von

[102] Als Verflechtung sei hier die unabsichtliche Beeinflussung von Arbeitsschritten als Folge des Eingriffs in den Produktionsaufbau und –ablauf gemeint

Optimierungsschritt OS_2 ist ein behutsamer, lokaler Eingriff in den Produktionsablauf. Die Anzahl der Verflechtungen ist auch bei zyklischer Wiederholung gering.

Die Auswirkungen einer zyklischen Wiederholung von Optimierungsschritt OS_1 lassen sich aufgrund der potentiell hohen Verflechtungen kaum abschätzen, eine Optimierung würde einem „Stochern auf gut Glück“ gleichkommen. Der zyklische Zustandsübergang im Zustand B_i wird folglich aus dem Ablaufplan entfernt:

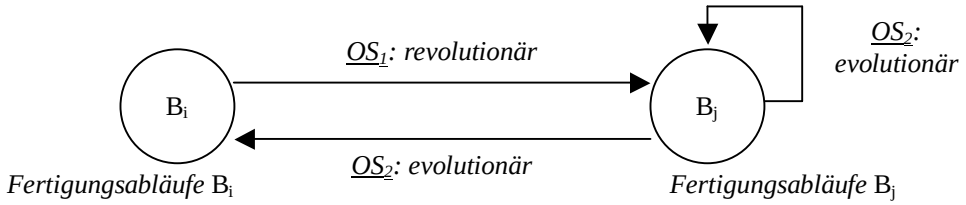

Abb. 34: modifizierter nichtdeterministischer Ablauf der Optimierung

Der nichtdeterministische Charakter des Optimierungsablaufs reduziert sich nun auf die Fragestellung, ob im Zustand B_j der Übergang zu Zustand B_i oder B_j zu erfolgen hat. Die Auflösung dieses Nichtdeterminismus erfolgt durch Anwendung folgender **Entscheidungsregel**:

Führe den Optimierungsschritt OS_2 solange durch, bis aufgrund der berechneten Kennzahlen ersichtlich wird, daß das Optimierungspotential von OS_2 erschöpft ist (dazu kann entweder der relative Gewinn bezogen auf den Vorgängerzustand oder eine Höchstschranke für die Anzahl der Wiederholungen von OS_2 verwendet werden). Wird ersichtlich, daß es erschöpft ist, erfolgt die Anwendung von Optimierungsschritt OS_1. Anschließend wird OS_2 wieder solange wiederholt, bis sich sein Optimierungspotential erschöpft, usw.

Innerhalb des Suchraums (vgl. Abbildung 31) wird mit Hilfe der Entscheidungsregel für jeden Knoten entschieden, welcher der beiden möglichen Pfade zu verfolgen ist.

4.4 Ablauf der Optimierungsphase

Die Optimierungsphase implementiert die in Kapitel 4.3 eingeführte Optimierungsstrategie. Ihr Ablauf ist in Abbildung 35 wiedergegeben.

Zunächst wird das Ausgangsszenario (Eingabedatum für die Optimierungsphase) durch Generierung von Kennzahlen in seiner Qualität beschrieben und als Vergleichsmaßstab für alle weiteren Optimierungsschritte („bestes Ergebnis E“) sowie als Ergebnis des letzten („Ergebnis L“) und des vorletzten („Ergebnis V“) Optimierungslaufs abgelegt. Die Generierung der Kennzahlen erfolgt durch Analyse der Simulationsdaten („*tracefile*“), welche nach Aufruf des AM-Prüfstandmoduls vorliegen. Man beachte, daß dies bereits Angaben über Engpässe im Produktionsablauf einschließt. Anschließend beginnt der eigentliche zyklische Ablauf der Optimierungsphase.

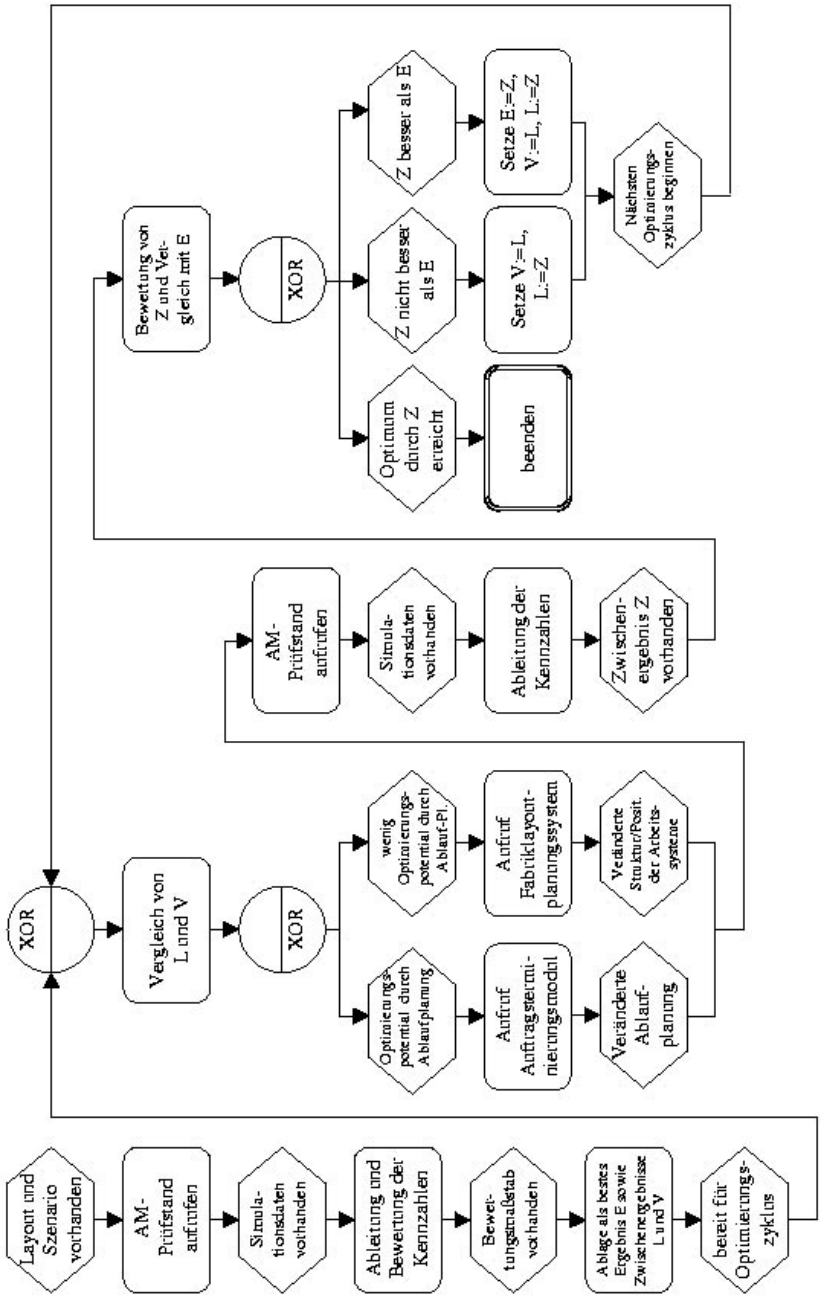

Abb. 35: Die Optimierungsphase des Produktionsoptimierungsprozesses

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.3 erfolgt die Auswahl des nächsten auszuführenden Optimierungsschritts danach, ob in der Anwendung einer Veränderung der zeitlichen Ablaufplanung noch Optimierungspotential gesehen wird. Dies wird durch Vergleich der Ergebnisse des letzten („L“) und des vorletzten Optimierungsdurchlaufs („V“) bestimmt. Je nach der Ausgestaltung des Teilmoduls Auftragsterminierung (vgl. Abschnitt 4.7) ist es denkbar, an dieser Stelle eine **Minimalschranke** einzusetzen, die angibt, wie oft das Auftragsterminierungsmodul in jedem Fall ausgeführt wird, bevor der Vergleich bezüglich des Optimierungspotentials durchgeführt wird. Der Vergleich selbst erfolgt analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.6 über die „r-Werte“ (siehe dort)[103]. Je nach dem erfolgt nun der Aufruf an das Teilsystem Fabriklayoutplanung oder Auftragsterminierung. Das Ergebnis des ausgewählten Optimierungsschritts wird wieder durch Aufruf des AM-Prüfstandsmoduls anhand der Generierung von Kennzahlen bewertet und als Zwischenergebnis „Z“ des gegenwärtigen Optimierungszyklus‘ abgelegt. Dieses wird gemäß den externen Zielvorgaben evaluiert, um festzustellen, ob die gewünschte Optimalität des Produktionsablaufs erreicht wurde. Falls dem nicht so ist, wird überprüft, ob es sich bei dem Zwischenergebnis um das im Zuge der Optimierungsphase bislang beste Ergebnis handelt (Vergleich mit „E“), und es wird ggf. als neues Referenzergebnis abgelegt, bevor der Optimierungszyklus erneut durchgeführt wird. Falls es sich bei dem erreichten Zwischenergebnis um ein optimales Ergebnis handelt, wird die Optimierungsphase abgeschlossen.

Als Ergänzung des beschriebenen Ablaufs empfiehlt es sich ferner, eine Höchstgrenze für die Optimierungsdauer einzuschalten (z.B. Anzahl der durchgeführten Optimierungsschritte). Bei Erreichen dieser Grenze liefert der Produktionsoptimierungsprozeß dann den bisher besten Produktionsablauf zurück. Auf diese Weise wird verhindert, daß bei unerfüllbaren Optimalitätskriterien keine unendliche Fortführung des Produktionsoptimierungsprozesses erfolgt.

4.5 Kennzahlen

Kennzahlen dienen dazu, (1) die Güte eines Produktionsablaufs hinsichtlich bestimmter Kriterien meßbar zu machen und (2) als Ansatzpunkte für die nachfolgenden Optimierungssysteme[104]. Zur Generierung der Kennzahlen werden die Produktionsabläufe vom Auftragsmanagementprüfstandsmodul simuliert. Das Ergebnis eines solchen Simulationslaufs sind noch keine aussagekräftigen Kennzahlen, sondern eine Menge von Simulationsdaten, die Aufschluß darüber geben, **wann welche Operation wo** durchgeführt wurde. Im Unterschied zu den **Plan**start- und Endzeitpunkten erhält man also die **Ist**Start- und Endzeitpunkte der einzelnen Arbeitsschritte. Diese Angaben werden vom Auftragsmanagementprüf-standsmodul in Form einer seperaten Datei („*tracefile*“) zurückgeliefert und müssen in Attribute (vgl. Abb. 41 und 42) der Fertigungsauftrag- und Arbeitsschrittklassen geschrieben werden.

Zur Systematisierung der Kennzahlen wird danach unterschieden, auf welche **Objekte** sie sich beziehen. Dies können einzelne Arbeitsschritte, Fertigungsaufträge, Arbeitssysteme, die Produktionsstätte oder der gesamte Ablauf der Produktion sein:

[103] z.B.: Weiteres Optimierungspotential liegt nur vor, falls r-Wert 2 um 10% besser ist als r-Wert 1
[104] z.B. Engpaßangaben als Ansatzpunkt für das zeitliche Verschieben von Arbeitsschritten

- Auf einzelne Arbeitsschritte bezogen: Durchlaufzeit, Terminabweichung
- Auf einzelne Fertigungsaufträge bezogen: Durchlaufzeit, Lieferterminabweichung
- Auf einzelne Arbeitssysteme bezogen: mittlerer und maximaler Auslastungsgrad, mittlerer und maximaler Durchsatz
- Auf die Produktionsstätte bezogen: Flächennutzung
- Auf den gesamten Ablauf der Fertigung bezogen: Gesamte Durchlaufzeit aller Fertigungsaufträge, durchschnittliche Liefertermintreue, Häufigkeit von Terminverzügen, Gesamtauslastungsgrad
- Kenngrößen bezogen auf externe Objekte: Investitionsausgaben

Im folgenden werden die Kennzahlen einschließlich Methoden zu ihrer Ableitung erläutert. Die Ablage der Kennzahlen erfolgt direkt in den entsprechenden Klassen, d.h. die Klassendiagramme aus Kapitel 3 werden um Attribute zur Speicherung der Kennzahlen erweitert. Die algorithmische Darstellung erfolgt in Pseudocode.

4.5.1 Kennzahlen einzelner Arbeitsschritte: Durchlaufzeit, Terminabweichung

Die arbeitsschrittbezogene **Durchlaufzeit** gibt die Zeitspanne wieder, die vom Beginn des betrachteten Arbeitsschritts bis zum Beginn des auf dem betreffenden Arbeitssystem unmittelbar nachfolgenden Arbeitsschritts insgesamt verstreicht[105].

```
// Annahme: Der betrachtete Arbeitsschritt ist in AktGang gespeichert

// (1) Bestimmung des auf AktGang folgenden Arbeitsschritts:
Setze AktNachfolger := NULL

Iteriere über alle Arbeitsschritt-Datensätze

   Sei AG der nächste Arbeitsschritt in der Liste

   if AG.arbeitssystem = AktGang.arbeitssystem and AG != AktGang then

      if AktNachfolger = NULL and AG.istStart > AktGang.istStart then
         Setze AktNachfolger := AG
      elsif AG.istStart < AktNachfolger.istStart
         and AG.istStart > AktGang.istStart then
            Setze AktNachfolger := AG
      endif
   endif

// (2) Bestimmung der Durchlaufzeit von AktGang
if AktNachfolger = NULL then
   Setze AktGang.durchlaufzeit := Aktgang.sollEnde - Aktgang.sollStart
else
   Setze AktGang.durchlaufzeit := AktNachfolger.istStart
                                  - AktGang.istStart
endif
```

Abb. 36 Ermittlung der arbeitsschrittbezogenen Durchlaufzeit

[105] Vgl. Zäpfel (1982), S. 222

Zu ihrer Berechnung muß das Zeitintervall, das zwischen den Startzeitpunkten der beiden Arbeitsschritte liegt, durch Subtraktion ermittelt werden (vgl. Abbildung 36).

Die Ermittlung des auf dem eingesetzten Arbeitssystem unmittelbar nachfolgenden Arbeitsschritts erfolgt durch Iteration über alle Arbeitsschritt-Datensätze und liefert denjenigen Arbeitsschritt, der (1) auf dem gleichen Arbeitssystem wie der aktuell betrachtete durchgeführt wird und (2) dessen Ist-Startzeit am nächsten auf die Ist-Startzeit des betrachteten Arbeitsschritts folgt. Falls es sich bei dem betrachteten Arbeitsschritt um den letzten ausgeführten Arbeitsschritt der Planungsperiode handelt (d.h. kein Nachfolger gefunden werden kann), wird die Durchlaufzeit gleich der geplanten Durchlaufzeit gesetzt. Dies sollte keine schwerwiegende Einschränkung sein, da zu diesem Zeitpunkt der Fertigung (letzter ausgeführter Arbeitsschritt) keine weiteren Engpässe vorliegen sollten.

Die Minimierung der Durchlaufzeit ist äquivalent zur

- Minimierung der Leerzeit und des Leerzeitanteils;
- Minimierung der Gesamtwartezeit[106].

Aus diesem Grund beschränkt sich diese Arbeit auf die Kenngröße Durchlaufzeit, welche Angaben über Leer- und Wartezeiten implizit enthält.

Die **Termintreue** ist ein Maß dafür, inwiefern die einzelnen Arbeitsschritte tatsächlich gemäß der Planvorschriften bearbeitet werden. Die arbeitsschrittbezogene **Terminabweichung** gibt dabei die Zeitspanne an, die ein Arbeitsschritt zu früh oder zu spät bearbeitet wurde[107]. Dabei soll ein Überschreiten (istEnde > sollEnde) zu einer positiven Terminabweichung führen, ein Unterschreiten zu einer negativen. Die Berechnung muß also durch die Subtraktion der geplanten Endzeit von der Ist-Endzeit erfolgen (istEnde – sollEnde). Da die Ist-Endzeiten nicht direkt aus dem „*tracefile*“ ableitbar sind (das „*tracefile*“ enthält nur **Start**-Zeitpunkte), muß zur Berechnung der Umweg über die Durchlaufzeit erfolgen (istEnde = istStart + Durchlaufzeit). Abbildung 37 zeigt die Ermittlung der arbeitsschrittbezogenen Terminabweichung.

```
// Annahme: Der betrachtete Arbeitsschritt ist in AktGang gespeichert und
// seine Durchlaufzeit bereits berechnet

Setze AktGang.terminabweichung := (AktGang.iststart
                                  + AktGang.durchlaufzeit)
                                  - AktGang.sollEnde
```

Abb. 37: Ermittlung der arbeitsschrittbezogenen Terminabweichung

4.5.2 Kennzahlen einzelner Fertigungsaufträge: Durchlaufzeit, Liefertermintreue

Wie bereits in Kapitel 2.1.6 ausgeführt, gibt die Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrags die Zeitspanne zwischen Beginn des ersten Arbeitsschritts und der Fertigstellung des Auftrags an[108]. Die fertigungsauftragsbezogene Durchlaufzeit

[106] Vgl. Domschke/Scholl/Voß (1993), S. 183
[107] Vgl. Blohm (1988), S. 273f.
[108] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 402

kann entweder durch Aufaddieren der einzelnen auftragsbezogenen Durchlaufzeiten[109] oder durch Subtraktion des Startzeitpunkt des ersten Arbeitsschritts des Fertigungsauftrags vom End-Zeitpunkts des letzten Arbeitsschritts berechnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die zweite, einfachere Methode verwendet (vgl. Abbildung 38).

```
// Annahme: Der betrachtete Fertigungsauftrag ist in AktFert gespeichert
// und die Durchlaufzeiten seiner zugehörigen Arbeitsschritte bereits
// berechnet

// (1) Aufsuchen des ersten und letzten Arbeitsschritts von AktFert

Setze ErsterAG := NULL, LetzterAG := NULL

Iteriere über alle Arbeitsschritte

   Sei AG der nächste Arbeitsschritt in der Liste

   if AG.auftrag = AktFert.auftragsnummer then

      if ErsterAG = NULL then
         Setze ErsterAG := AG
      endif
      if LetzterAG = NULL then
         Setze LetzterAG := AG
      endif

      if AG.arbeitsgangNummer < ErsterAG.arbeitsgangNummer then
         Setze ErsterAG := AG
      endif

      if AG.arbeitsgangNummer > LetzterAG.arbeitsgangNummer then
         Setze LetzterAG := AG
      endif

   endif

// (2) Berechnung der fertigungsauftragsbezogenen Durchlaufzeit

Setze AktFert.durchlaufzeit := (LetzterAG.istStart
                               + LetzterAG.durchlaufzeit)
                               - ErsterAG.istStart
```

Abb. 38: Ermittlung der fertigungsauftragsbezogenen Durchlaufzeit

Zur Fähigkeit der Einhaltung von Lieferfristen wird die Minimierung der **Terminabweichungen** gefordert, da sowohl aus dem Über- als auch Unterschreiten von Lieferterminen Zusatzkosten (z.B. Konventionalstrafen, notwendig gewordene Preisnachlässe, Überstunden, Lagerungskosten) entstehen[110]. Terminabweichungen bezogen auf Fertigungsaufträge werden in analoger Weise zu Terminabweichungen bezogen auf Arbeitsschritte berechnet: (Ist-Ende des Fertigungsauftrags = Ist-Ende des letzten Arbeitsschritts) – soll-Ende des Fertigungsauftrags, wobei erneut ein

[109] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 450
[110] Vgl. Blohm (1988), S. 273f.

Überschreiten des Termins zu einer positiven Abweichung, ein Unterschreiten zu einer negativen Abweichung führen soll (vgl. Abbildung 39).

```
// Annahme: Der betrachtete Fertigungsauftrag ist in AktFert gespeichert,
// der letzte Arbeitsschritt des Fertigungsauftrags sei bekannt
// (LetzterAG) und alle Durchlaufzeiten seien bereits berechnet

Setze AktFert.terminabweichung := (LetzterAG.iststart
                                  + LetzterAG.durchlaufzeit)
                                  - AktFert.sollEnde
```

Abb. 39: Ermittlung der fertigungsauftragsbezogenen Terminabweichung

4.5.3 Kennzahlen einzelner Arbeitssysteme: Kapazitätsauslastung, Durchsatz, Engpässe

Unter der quantitativen Kapazität wird das mengenmäßige Leistungsvermögen einer Produktiveinheit bezogen auf eine Zeitperiode verstanden, als Maßgröße findet in der Regel die Ausbringungsmenge eines Produkts pro Zeitspanne Verwendung[111]. Das Kapazitätsangebot ergibt sich dabei aus den vorhandenen Kapazitäten der Arbeitssysteme, die Kapazitätsnachfrage ist durch die Fertigungsaufträge bestimmt. Im Normalfall stimmen Kapazitätsangebot und -nachfrage in den einzelnen Perioden nicht überein, es kommt zu Unterauslastungen und Überauslastungen[112].

Die **Kapazitätsauslastung** k_j eines Arbeitssystems ergibt sich nach folgender Berechnungsvorschrift[113]:

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i + \sum_{i=1}^{n} l_i}$$

j = Nummer des Arbeitssystems

n = Anzahl der Aufträge für das Arbeitssystem

b_i = Bearbeitungszeit von Auftrag i am Arbeitssystem

l_i = ablaufbedingte Leerzeit am Arbeitssystem vor Bearbeitung des Auftrags i

Unter einem **Durchsatz** wird die auf eine Produktionsperiode bezogene Quantität eines Gutes verstanden[114]. Bezogen auf ein Arbeitssystem handelt es sich hierbei also um ein generelles Mengenmaß für den geleisteten Output im Betrachtungszeitraum.

Um eine möglichst hohe Kapazitätsauslastung erreichen zu können, muß aufgrund der stochastisch verteilten Bearbeitungsreihenfolge und der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten jeweils eine **Warteschlange** vor den Arbeitssystemen eingeplant werden, da ansonsten mit Leerzeiten zu rechnen ist[115]. Je nach Typ des Arbeitssystems gibt es eine Schranke für die Länge der Warteschlange, ab welcher keine weiteren Arbeitsgänge zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingelagert werden dürfen (vgl. die Definition der `Schranken`-Attribute aus Kapitel 3.3.1). Falls die

[111] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 123
[112] Vgl. Blohm (1988), S. 286
[113] Vgl. Blohm (1988), S. 274f.
[114] Vgl. Fandel (1991), S. 143
[115] Vgl. Blohm (1988), S. 275

Länge der Warteschlange diesen Wert übersteigt, so liegt ein **Engpaß** am betreffenden Arbeitssystem vor, der die Produktion negativ beeinträchtigt.

Für die Auswertung des *„tracefiles“* bezüglich der Kapazitätsauslastung und des Durchsatzes an jedem Arbeitssystem existieren bereits Werkzeuge und Verfahren, die am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung entwickelt wurden[116]. Aus diesem Grund geht diese Arbeit davon aus, daß die folgenden Informationen über jedes Arbeitssystem nach Aufruf des Auftragsmanagement-prüfstands (und anschließend eines Auswertungswerkzeugs) zur Verfügung stehen:

- Kapazitätsauslastung des Arbeitssystems;
- Durchsatz des Arbeitssystems in der betrachteten Periode;
- Anzahl der Engpässe (inklusive Zeitangaben) innerhalb der betrachteten Periode.

4.5.4 Kennzahlen der Produktionsstätte: Transportkosten, Flächennutzung

Bei der Bewertung der Produktionsstätte (also der räumlichen Gegebenheiten) spielt vor allem das Ergebnis Fabriklayoutgenerierung eine Rolle. Als Determinante der Durchlaufzeit ist ferner der **Materialfluß**, welcher die **Transportkosten** beeinflußt, wichtig. Häufig wird unterstellt, daß zwischen den Transportkosten und der Entfernungen der Arbeitssysteme eine proportionale Beziehung besteht[117]. Für die Transportkosten K_{Trans} ergibt sich danach die folgende Zielfunktion:

$$K_{Trans} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} d_{ij} * \lambda_{ij}$$

n = Anzahl der Arbeitssysteme

d_{ij} = Entfernung zwischen den Arbeitssystemen i und j

λ_{ij} = Transportintensität = Materialfluß pro Periode zwischen Arbeitssystem i und j

Die Entfernungen der Arbeitssysteme lassen sich aus dem Attribut `position` der Klasse Arbeitssystem mit Hilfe einer einfachen Abstandformel[118] berechnen. Der Materialfluß ergibt sich wieder durch Analyse des vom Auftragsmanagementprüf-stand erzeugten *„tracefiles“* mit Hilfe eines geeigneten Werkzeugs.

Die Formel läßt sich verfeinern, wenn zusätzlich der Transportkostensatz für den Transport von Arbeitssystem i nach j bekannt ist. Es ergibt sich dann folgende Formel:

$$K_{Trans} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} d_{ij} * \lambda_{ij} * k_{ij}$$

k_{ij} = Kostensatz für den Transport von Produkten von Arbeitssystem i nach j

Als weiteres Maß für die Güte des errechneten Fabriklayouts soll die Raumausnutzung, d.h. die **Nutzung der verfügbaren Fläche**, verwendet werden. Sie soll im Rahmen dieser Arbeit direkt als Kenngröße vom Fabriklayoutplanungs-modul geliefert werden[119].

---

[116] Von Herrn Dipl.-Ing. Hans-Hermann Wiendahl, Projektleiter Bereich Unternehmensmanagement
[117] Vgl. Corsten (1992), S. 388
[118] Die Entfernung d zwischen zwei Punkten (x_1, y_1) und (x_2, y_2) beträgt danach $d = ((x_1-x_2)^2 + (y_2-y_2)^2)^{1/2}$
[119] Sie ist als Kenngröße in der relativen Datenbank des FLP-Systems abgelegt.

4.5.5 Kennzahlen der gesamten Fertigung: Häufigkeit von Terminverzügen, Kapazitätsauslastung, Durchlaufzeit, Standardabweichung der Termintreue

Die folgenden Kennzahlen beziehen sich auf die gesamte Fertigung innerhalb der betrachteten Periode. Hierbei sei als erstes die absolute **Häufigkeit von Terminverzügen** von Fertigungsaufträgen als dispositive Kennzahl genannt. Sie errechnet sich durch einfaches Aufaddieren aller Fertigungsaufträge, deren Ist-Endzeiten größer als ihre soll-Endzeiten sind[120] (vgl. Abbildung 40).

```
// Die Durchlaufzeiten aller Fertigungsauftraege nach Ende der Simulation
// seien bekannt

Setze Verzuege := 0;

Iteriere über alle Fertigungsaufträge

   Setze Fert := dem nächsten Fertigungsauftrag in der Liste

   if (Fert.istStart + Fert.durchlaufzeit) > Fert.sollEnde then
      Setze Verzuege := Verzuege + 1

   endif
```

Abb. 40: Bestimmung der Häufigkeit von Terminverzügen

Eine weitere Kenngröße ist die **Kapazitätsauslastung** des gesamten Produktionssystems. Sie läßt sich in Anlehnung an die Formel aus Abschnitt 4.5.3 (Kapazitätsauslastung bezogen auf ein einzelnes Arbeitssystem) nach folgender Vorschrift berechnen[121]:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} b_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} b_{ij} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} l_{ij}}$$

n = Anzahl der Aufträge für das Arbeitssystem

m = Anzahl der Arbeitssysteme

b_{ij} = Bearbeitungszeit von Auftrag i am Arbeitssystem j

l_{ij} = ablaufbedingte Leerzeit am Arbeitssystem j vor Bearbeitung des Auftrags i

Alternativ kann die **durchschnittliche Kapazitätsauslastung** aller Arbeitssysteme verwendet werden. Ihre Berechnung ergibt sich als einfacher Durchschnitt aller Einzelauslastungen:

$$k = \frac{1}{m} * \sum_{j=1}^{m} k_j$$

m = Anzahl der Arbeitssysteme

k_j = Auslastungsgrad des Arbeitssystems j

Das wichtige Ziel der Minimierung der Durchlaufzeit bezieht sich aus Sicht des gesamten Produktionssystems auf die Minimierung der **Summe der Durchlaufzeiten** aller Fertigungsaufträge:

---

[120] Vgl. Warnecke (1984), S. 272
[121] Vgl. Blohm (1988), S. 274

$$D = \sum_{j=1}^{f} D_j$$

f = Anzahl der Fertigungsaufträge

D_j = Durchlaufzeit des Fertigungsauftrags j

Ihre Berechnung erfolgt analog zur Vorgehensweise aus Abbildung 40 (vgl. oben).

Als letze Kennzahlen des Fertigungsablaufs seien die **durchschnittliche Terminabweichung** und die **Standardabweichung der Terminabweichung** aller Fertigungsaufträge eingeführt. Sie können als Maß für die Fähigkeit zur Einhaltung von Lieferfristen und damit für die durch Terminabweichungen entstehende Kosten angesehen werden[122]. Ihre Berechnung erfolgt nach folgenden Formeln[123]:

$$\overline{t} = \frac{1}{f} * \sum_{j=1}^{f} t_j$$

f = Anzahl der Fertigungsaufträge

t_j = Terminabweichung des Fertigungsauftrags j

Und weiter:

$$t^2 = \sum_{j=1}^{f} (t_j - \overline{t})^2$$

$\overline{t}$ = durchschnittliche Terminabweichung

$$t = (+)\sqrt{t^2}$$

t = Standardabweichung der Terminabweichung

4.5.6 Weitere Kennzahlen: Investitionsausgaben

Investitionsausgaben können entstehen, falls vom Fabriklayoutsystem der Einsatz eines neuen Arbeitsystems vorgeschlagen wird, welches bestehende ergänzt oder ersetzt. Sie können folglich nicht berechnet werden, sondern werden nach ihrer Höhe vom Fabriklayoutplanungsmodul oder als externe Angabe übernommen.

4.5.7 Zusammenfassung: Klassendiagramme

Im folgenden seien die Klassendiagramme derjenigen Klassen aufgeführt, die aufgrund der obigen Ausführungen neue Attribute zur Speicherung von Kennzahlen erhalten haben. Im einzelnen:

- Die Klasse Fertigungsauftrag wird um die Attribute `istStart`, `durchlaufzeit` und `terminAbweichung` erweitert (vgl. Abbildung 41).
- Die Klasse Arbeitsschritt wird ebenfalls um die Attribute `istStart`, `durchlaufzeit` und `terminAbweichung` erweitert (vgl. Abbildung 42).
- Die Klasse Arbeitssystem wird um die Attribute `kapazitaetsAuslastung`, `durchsatz` und `engpaesse` erweitert (vgl. Abbildung 43).

[122] Vgl. Blohm (1988), S. 273f.
[123] Vgl. Bamberg/Baur (1996), S. 21

Fertigungsauftrag	
bezeichnung	:string
auftragsNummer	:integer
unterAuftragsNummer	:integer
prioritaet	:integer
menge	:real
produkt	:Produkt
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum
istStart	:Datum
durchlaufzeit	:Zeitdauer
terminAbweichung	:Zeitdauer

Abb. 41: Die erweiterte Klasse `Fertigungsauftrag`

Arbeitsschritt	
auftrag	:Auftrag
arbeitsgangNummer	:integer
menge	:real
produkt	:Produkt
arbeitssystem	:Arbeits-system
ruestZeit	:Zeitdauer
prozessZeit	:Zeitdauer
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum
fahrplan	:Fahrplan
istStart	:Datum
durchlaufzeit	:Zeitdauer
terminAbweichung	:Zeitdauer

Abb. 42: Die erweiterte Klasse `Arbeitsschritt`

```
Arbeitssystem
-------------------------------------------
bereich                :     string
kostenstelle                 :string
maschinenGruppe              :string
bezeichnung                  :string
kategorie                    :string
schichtmodell                :Schicht
personalBedarf               :real
auftragsBelastungsSchranke   :integer
stundenBelastungsSchranke    :real
position                     :Position
ausdehnung                   :Region
fix                          :boolean
kapazitaetsAuslastung        :real
durchsatz                    :integer
engpaesse                    :list of
                              Datum
-------------------------------------------
```

Abb. 43: Die erweiterte Klasse `Arbeitssystem`

4.6 Optimierung nach mehrfachen Kriterien (*Multicriteria Optimization*[124])

Wie im vorigen Abschnitt gesehen, wird ein Szenario der Produktion (ein bestimmter Produktionsablauf) durch eine Vielzahl von Kenngrößen beschrieben. Dies waren im einzelnen:

- Kennzahlen einzelner Arbeitsgänge: Durchlaufzeit, Terminabweichung
- Kennzahlen einzelner Fertigungsaufträge: Durchlaufzeit, Liefertermintreue
- Kennzahlen einzelner Arbeitssysteme: Kapazitätsauslastung, Durchsatz, Engpässe
- Kennzahlen der Produktionsstätte: Transportkosten, Flächennutzung
- Kennzahlen der gesamten Fertigung: Häufigkeit von Terminverzügen, Kapazitätsauslastung, Durchlaufzeit, Standardabweichung der Termintreue
- Weitere Kennzahlen: Investitionsausgaben

Die entscheidende Fragestellung, welche in diesem Abschnitt behandelt werden soll, lautet nun: Wann ist ein bestimmter Produktionsablauf, basierend auf den generierten Kennzahlen, als optimal einzustufen?

Dies würde sich leicht beantworten lassen, falls es nur genau eine aussagekräftige Kennzahl geben würde. In diesem Fall wäre der optimale Produktionsablauf jener, für welchen die betreffende Kennzahl ihren besten Wert annehmen würde. Wäre beispielswiese allein die aggregierte Durchlaufzeit von Interesse, so müßte vom

[124] In Anlehnung an Yu/Zhang (1992)

Produktionsoptimierungssystem der Produktionsablauf gefunden werden, für welchen die Durchlaufzeit minimal ist. Was aber ist zu tun, wenn zusätzlich die Kapazitätsauslastung beachtet werden soll? Muß die Durchlaufzeit in diesem Fall immer noch den minimalen Wert annehmen, oder könnte sie im Gegenzug einer vielleicht besseren Kapazitätsauslastung einen geringfügig höheren Wert annehmen? Was ist dann unter „geringfügig“ zu verstehen? Und wie verändert sich dies, falls auch noch die Standardabweichung der Termintreue, Flächennutzung oder die Termintreue eines speziellen, besonders wichtigen Fertigungsauftrags beachtet werden soll?

Zunächst soll, um das obige Problem einigermaßen überschaubar zu machen, die Menge der Kennzahlen, welche zur Optimierungsentscheidung herangezogen werden, eingegrenzt werden. Der Verfasser dieser Arbeit ist der Ansicht, daß es bei der meist in der Praxis vorliegenden großen Anzahl von Fertigungsaufträgen und damit verbunden Arbeitsschritten nicht zweckmäßig ist, jeden einzelnen Arbeitsschritt in die Berechnung des Optimums mit einzubeziehen. Allerdings können bestimmte Fertigungsaufträge, z.B. aufgrund ihres Transaktionsvolumens, von besonderer Bedeutung für das Unternehmen sein. Aus diesem Grund soll auf Ebene der Fertigungsaufträge die Möglichkeit gegeben sein, durch Angabe einer Gewichtungsstufe zu entscheiden, in welcher Art und Weise die Kennzahlen des Fertigungsauftrags in die Optimierungsentscheidung einfließen sollen. Die Klasse `Fertigungsauftrag` wird deshalb um das Attribut `gewichtung` erweitert (vgl. Abbildung 44).

Fertigungsauftrag	
bezeichnung	:string
auftragsNummer	:integer
unterAuftragsNummer	:integer
prioritaet	:integer
menge	:real
produkt	:Produkt
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum
istStart	:Datum
durchlaufzeit	:Zeitdauer
terminAbweichung	:Zeitdauer
gewichtung	:integer

Abb. 44: Die nochmals erweiterte Klasse Fertigungsauftrag

Die Gewichtung soll dabei vier verschiedene Werte annehmen können, deren Bedeutung der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen ist:

Gewichtung	Bedeutung
0	Kennzahlen des Fertigungsauftrags finden keine unmittelbare Beachtung bei der Berechnung des Optimums
1	Kennzahlen des Fertigungsauftrags werden bei der Berechnung des Optimums mit geringer Gewichtung beachtet
2	... mit mittlerer Gewichtung beachtet
3	... mit hoher Gewichtung beachtet

Tabelle 2: Gewichtung von Fertigungsaufträgen und ihre Bedeutung

Aus den Einzelkennzahlen aller Fertigungsaufträge mit einer Gewichtung größer Null wird jeweils eine aggregierte Kennzahl berechnet. Dabei soll gelten, daß die Summe der Fertigungsaufträge mit hoher Gewichtung 70% des Gesamtanteils an der Kennzahl ausmachen, Fertigungsaufträge mit mittlerer Gewichtung 20% und Fertigungsaufträge mit niedriger Gewichtung insgesamt 10%[125].

Beispiel:

Es seien 2 Fertigungsaufträge mit hoher Gewichtung vorhanden (Durchlaufzeiten D_1 und D_2), 4 mit mittlerer (Durchlaufzeiten D_3 bis D_6) und 4 mit niedriger Priorität (Durchlaufzeiten D_7 bis D_{10}). Die **spezielle Fertigungsdurchlaufzeit** setzt sich dann folgendermaßen zusammen:

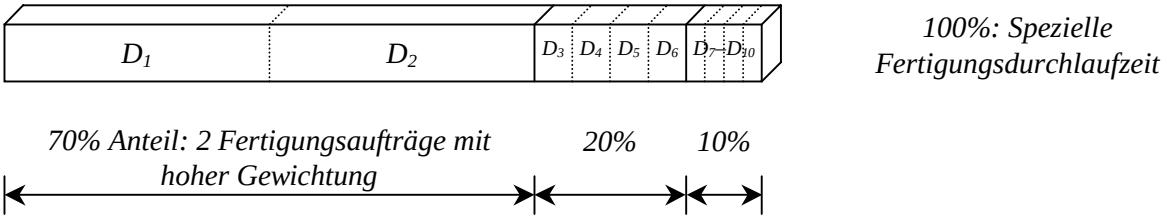

Abb. 45: Zusammensetzung der speziellen Fertigungsdurchlaufzeit

Die **spezielle Fertigungsterminabweichung** ergibt sich in analoger Weise, wobei zu beachten ist, daß hierbei die **Beträge** der Einzelterminabweichungen aufzuaddieren sind, da negative Abweichungen (falls ein Fertigungsauftrag zu früh fertiggestellt wurde) ausdrücklich zugelassen wurden. Negative Abweichungen sollen Verspätungen jedoch **nicht** aufwiegen, da sie ebenfalls zu Zusatzkosten führen[126].

Zur weiteren Reduzierung der Menge der einzubeziehenden Kennzahlen werden die auf einzelne Arbeitssysteme bezogenen Kenngrößen zur Optimierungsentscheidung nur in ihrer aggregierten Form verwendet. Als Menge der zu beachtenden Kenngrößen ergibt sich dann:

[125] Eigene Festsetzung der Gewichtungsanteile durch den Verfasser
[126] Vgl. Blohm (1988), S. 273f

- Spezielle Fertigungsdurchlaufzeit, spezielle Fertigungslieferterminabweichung
- Transportkosten, Flächennutzung
- Häufigkeit von Terminverzügen, Kapazitätsauslastung, gesamte Durchlaufzeit, Standardabweichung der Termintreue
- Weitere Kennzahlen: Investitionsausgaben

Es ist also die Aufgabe des Produktionsoptimierungssystems, aufgrund der oben aufgezählten **neun Kenngrößen** zu entscheiden, wann ein Produktionsablauf als optimal eingestuft werden kann.

Exkurs: Theorie der Optimierung nach mehrfachen Entscheidungskriterien (Multicriteria Optimization)

Die Theorie der Optimierung nach mehrfachen Entscheidungskriterien findet überall dort Anwendung, wo Entscheidungen hinsichtlich mehrerer, simultan zu beachtender Ziele getroffen werden müssen. Hierbei gibt es vier Basiskonzepte: Präferenzmodelle, Wertfunktionen, Zufriedenstellungsmodelle (*satisficing models*) und Kompromißlösungen.

(a) Präferenzmodelle

Es sei Y die Menge aller möglichen Zustände (bzw. Werte) im Lösungsraum. Für jedes Paar y_1, $y_2 \in Y$ von Ergebnissen gibt es genau eine der folgenden Möglichkeiten:

1. y_1 ist besser als y_2, d.h. y_1 wird y_2 vorgezogen; Notation $y_1 > y_2$
2. y_1 ist schlechter als y_2, d.h. y_2 wird y_1 vorgezogen; Notation $y_1 < y_2$
3. y_1 ist genauso gut oder schlecht wie y_2; Notation $y_1 \sim y_2$
4. es sind keine Aussagen über y_1 und y_2 in der Art von 1.-3. möglich, die Relation zwischen y_1 und y_2 ist undefinierbar; Notation $y_1 ?\ y_2$[127].

Jede auf diese Weise abgeleitete Präferenzordnung läßt sich mit Hilfe einer **binären Relation** über Y darstellen. Eine binäre Relation R auf Y ist eine Teilmenge des karthesischen Produkts $Y \times Y$ mit den möglichen Eigenschaften

(1) *Reflexivität*, falls $\forall y \in Y$: $(y, y) \in R$;
(2) *Symmetrie*, falls $\forall y_1, y_2 \in Y$: $(y_1, y_2) \in R \Rightarrow (y_2, y_1) \in R$;
(3) *Transitivität*, falls $\forall y_1, y_2, y_3 \in Y$: $(y_1, y_2) \in R$ und $(y_2, y_3) \in R \Rightarrow (y_1, y_3) \in R$;
(4) *Vollständigkeit*, falls $\forall y_1, y_2 \in Y$, $y_1 \neq y_2$: $(y_1, y_2) \in R$ oder $(y_2, y_1) \in R$;
(5) *Equivalenz*, falls R reflexiv, symmetrisch und transitiv ist[128].

Eine **Präferenz** basierend auf > (bzw. <, ~, ?) ist eine binäre Relation über Y, notiert {>} (bzw. {<}, {~}, {?}) so, daß $(y_1, y_2) \in \{>\} \Leftrightarrow y_1 > y_2$. Unter einer **Präferenzstruktur** wird die Menge der so definierten Präferenzen {>}, {<}, {~}, {?} verstanden, notiert $\wp(\{>\}, \{<\}, \{\sim\}, \{?\})$ oder kurz $\wp$[129].

[127] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2672
[128] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2673
[129] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2673

Für einen gegebenen Punkt $y_0 \in Y$ und eine Präferenz über Y werden die folgenden Mengen mit Bezug auf y_0 definiert:

(1) $\{ y_0 <\} = \{y \in Y: y_0 < y\}$
(2) $\{ y_0 >\} = \{y \in Y: y_0 > y\}$
(3) $\{ y_0 \sim\} = \{y \in Y: y_0 \sim y\}$
(4) $\{ y_0 ?\} = \{y \in Y: y_0 ? y\}$
(5) $\{ y_0 \geq\} = \{y \in Y: y_0 > y\} \cup \{y \in Y: y_0 \sim y\}$
(6) $\{ y_0 >?\} = \{y \in Y: y_0 > y\} \cup \{y \in Y: y_0 ? y\}$
(7) $\{ y_0 \geq?\} = \{y \in Y: y_0 > y\} \cup \{y \in Y: y_0 \sim y\} \cup \{y \in Y: y_0 ? y\}$

Mit Hilfe dieser Definitionen können verschiedene Lösungskonzepte für das Optimierungsproblem formuliert werden: Gegeben sei eine Präferenzstruktur $\wp$ auf einer Menge von möglichen Ergebnissen Y.

(1) $y_0 \in Y$ ist eine N[>]-Lösung $\Leftrightarrow \{ y_0 >\} \cap Y = \emptyset$; die Menge aller solchen Lösungen wird mit N[>] notiert;
(2) $y_0 \in Y$ ist eine N[≥]-Lösung $\Leftrightarrow \{ y_0 \geq\} \cap Y = \{ y_0\}$; die Menge aller solchen Lösungen wird mit N[≥] notiert;
(3) $y_0 \in Y$ ist eine N[>?]-Lösung $\Leftrightarrow \{ y_0 >?\} \cap Y = \emptyset$; die Menge aller solchen Lösungen wird mit N[>?] notiert;
(4) $y_0 \in Y$ ist eine N[≥?]-Lösung $\Leftrightarrow \{ y_0 \geq?\} \cap Y = \{ y_0\}$; die Menge aller solchen Lösungen wird mit N[≥?] notiert[130].

Daraus ergibt sich unmittelbar[131]:

(1) $N[\geq?] \subseteq N[>?] \subseteq N[>]$
(2) $N[\geq?] \subseteq N[\geq] \subseteq N[>]$
(3) N[≥?] enthält höchstens einen Punkt y.

Bei Anwendung des Präferenzmodellverfahrens muß nach Aufstellen der Präferenzen >, <, ~ und ? zunächst versucht werden, die Menge N[<], dann N[≤] oder N[<?] und schließlich N[≤?] zu bestimmen, wobei letztere, falls sie nicht-leer ist, genau eine optimale Lösung enthält[132].

(b) Wertefunktionen (Value Functions)

Grundgedanke von Wertefunktionen ist es, die in (a) beschriebene Präferenzordnung mit Hilfe von Zahlen so auszudrücken, daß je größer die Präferenz, desto größer die abgebildete Zahl ist. Ziel ist es also, eine Präferenzstruktur $\wp$ über eine Wertefuntion $v: Y \rightarrow \Re$ so zu repräsentieren, daß $v(y_1) > v(y_2) \Leftrightarrow$ (y_1 wird gegenüber y_2 bevorzugt) und $v(y_1) = v(y_2) \Leftrightarrow$ (y_1 ist gegenüber y_2 indifferent)[133].

Folgende Bedingungen müssen von $\wp$ erfüllt sein, um eine solche Wertefunktion v aufstellen zu können:

[130] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2674
[131] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2674
[132] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2674
[133] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2674

(1) {?} = ∅; ansonsten kann die Wertefunktion keine eindeutige numerische Ordnung der Werte bieten;
(2) {>} und {≥} sind transitiv;
(3) Sei $\aleph$ die Menge aller isolierten Kurven von v in Y, V = v [Y] ein Intervall mit abzählbaren rationalen Werten. Ihre korrespondierenden isolierten Kurven sind dann ebenfalls abzählbar in $\aleph$;
(4) $\forall y \in Y$: {y<} und {y>} sind offene Mengen in Y[134].

Zur Konstruktion einer Wertefunktion v existieren verschiedene Ansätze. Eine Gruppe von Techniken ist die direkte Anwendung der Analysis, die Methoden basieren meist auf der Konstruktion angenäherter Indifferenzkurven. Eine andere Klasse von Methoden berücksichtigt die Tatsache, daß Präferenzordnungen meistens Inkonsistenzen enthalten und versucht, eine Wertefunktion zu finden, die die auftretenden Inkonsistenzen minimiert. Die letzte Gruppe schließlich basiert auf additiven Wertefunktionen. Sie soll hier kurz skizziert werden.

Unter der Annahme, daß q verschiedene Kriterien betrachtet werden, deren mögliche Werte in den Intervallen $[a_k, b_k]$ liegen, wird versucht, eine Wertefunktion der Form

$$v(y) = w_1 * v_1(y_1) + w_2 * v_2(y_2) + \ldots + w_q * v_q(y_q)$$

aufzustellen, wobei $v_k(y_k)$; k=1..q die Einzelkomponenten und $(w_1, w_2, \ldots w_q)$ die Gewichtsverteilungen sind. Die Bestimmung der Einzelkomponenten kann dabei nach der sog. **Mittwertmethode** erfolgen, für die Bestimmung der Gewichtungsverteilung kann die **Eigenwertmethode von Saaty** verwendet werden[135].

Wertefunktionen versuchen also, das Problem der Optimierung nach mehrfachen Kriterien auf die Optimierung nach nur einem einzigen Kriterium (nämlich der Wertefunktion) zurückzuführen. Voraussetzung ist, daß bezüglich der Präferenzstruktur $\wp$ und des Lösungsraums Y genaue Angaben existieren.

(c) Zufriedenstellungsmodelle (satisficing models)

Zielsuchendes Verhalten (*goal-seeking behavior*[136]) ist definiert als das Treffen von Maßnahmen, falls in beobachteten Zuständen (oder Werten) eine ungünstige Abweichung vom Idealzustand (Idealwert) oder Zielzustand (Zielwert) festgestellt wird. Es gibt hierbei zwei grundlegende Vorgehensweisen: Die Verwendung von **Zufriedenstellungsmodellen** und die Verwendung von Kompromißlösungen, mit denen sich der nächste Abschnitt beschäftigen wird[137].

Zufriedenstellung basiert auf dem Setzen von Zielen. Es sei Y wieder die Menge der Zustände im Lösungsraum und $f_1(y)$, $f_2(y)$, ... $f_q(y)$ seien Funktionen, die bestimmte Merkmale eines Zustands ausdrücken, wobei $f = f(y) = (f_1(y), f_2(y), \ldots f_q(y))$. Eine **Zufriedenstellungsbedingung** $G_i = G_i(f)$ ist dann eine Funktion über den Merkmalen

[134] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2674
[135] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2675f.
[136] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2677
[137] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2677

des Zustands, die ausdrückt, wann ein Zustand als zufriedenstellend angesehen wird. Ein $y \in Y$ wird dann mit Zufriedenstellung aus dem Lösungsraum ausgewählt, falls $G_i(f) = G_i(f_1(y), f_2(y), \ldots f_q(y)) \geq 0$.

Der Prozeß der Zielsetzung ist die Definition einer oder mehrerer alternativer Bedingungen G_i, bei deren Erreichung ein Zustand als zufriedenstellend und damit optimal angesehen wird. Die endgültige Zielmenge S ist die Menge aller Elemente, die alle Zustände enthält, bei deren Auswahl der Entscheidungstreffende zufriedengestellt ist und glaubt, eine optimale Lösung gefunden zu haben[138].

(d) Kompromißlösungen

Im folgenden sei jedes der q Kriterien f_i; i = 1..q, charakterisiert durch „je mehr desto besser“. Es sei $x^* = (x_1^*, x_2^*, \ldots x_q^*)$ mit $x_i^* = \sup \{f_i(y): y \in Y\}$ und Y wieder der Lösungsraum. Der Punkt x* wird dann **idealer (oder utopischer) Punkt** genannt, da er gewöhnlich nicht erreicht werden kann, obwohl x_i^* individuell erzielbar sein kann. Aus diesem Grund ist eine andere Lösung anzustreben, welche tatsächlich realisiert werden kann[139].

Für einen gegebenen Zustand $y \in Y$ kann das **Bedauern**, y anstatt des Idealpunkts y* gewählt zu haben, durch die **Entfernung** zwischen den zugehörigen Ausprägungen x = f(y) und x* = f(y*) angenähert werden. Das Bedauern r(x) wird daher definiert als

$$r(x) = \| x - x^* \|,$$

wobei $\| x - x^* \|$ die Entfernung zwischen x und x* nach einer näher zu bestimmenden Vorschrift ist. Typischerweise erfolgt die Entfernungsberechnung nach der l_p-Norm: Für ein $p \geq 1$ ergibt sich die Entfernung danach durch

$$r(x, p) = \| x - x^* \| = \left[\sum_{i=1}^{q} | x_i - x_i^* |^p \right]^{1/p}.$$

Falls die einzelnen Kriterien eine unterschiedliche Gewichtung haben sollen, kann ein **Gewichtungsvektor** zur Berechnung von r (x, p) herangezogen werden. Der Parameter p drückt nach der l_p-Norm die Betonung des Einzelnutzens gegenüber dem Gemeinnutzen aus. Für p=1 ist die Summe der Einzelkriterien am höchsten betont, während für $p \rightarrow \infty$ das individuelle Bedauern jeder Ausprägung am höchsten gewichtet ist[140].

Die **Kompromißlösung** ergibt sich nach der l_p-Norm aus demjenigen $y_p \in Y$, welches r (x, p) = r (f(y), p) über Y minimiert. Kompromißlösungen weisen eine Reihe nützlicher Eigenschaften auf, darunter Pareto-Optimalität, Symmetrie, Stetigkeit und Monotonie[141].

Ende des Exkurses.

---

[138] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2678
[139] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2679f.
[140] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2680
[141] Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2681

Welche der Basislösungen zur Optimierung nach mehrfachen Kriterien ist nun zur Verwendung durch das Optimierungssystem geeignet?

Präferenzmodelle haben den Vorteil, daß sie die kontinuierliche Vergleichbarkeit zwischen zwei Teilergebnissen ermöglichen. So ist es immer möglich, den gegenwärtig besten Produktionsablauf zwischenzuspeichern. Problematisch hingegen ist die Definition des Optimalitätskriteriums an sich: Da kein absoluter Vergleichs**wert** angegeben kann, muß ein Vergleichs**ablauf** im Sinne des Zufriedenstellungsmodells definiert werden, der einen Maßstab dahingehend darstellt, wann ein gefundener Produktionsablauf als „optimal“ angesehen werden kann. Das Aufstellen eines solchen Vergleichsablaufs ist jedoch kompliziert und fehlerträchtig, da es alle miteinzubeziehenden Entscheidungskriterien zu berücksichtigen hat. Es stellt sich ferner die Frage, auf welche Weise verschiedene Optimierungsziele unter Verwendung von Präferenzen formuliert werden können. Gegebenenfalls müßte für jeden Optimierungswunsch die gesamte Präferenzordnung neu definiert werden. Dies wirft die Fragestellung auf, wie Präferenzen zwischen verschiedenen **Szenarien** (d.h. bei Veränderung von innerhalb des Produktionsoptimierungsprozesses fixen Daten „von außen“) ermittelt werden können. Man müßte sich hierbei auf verschiedene Beispielszenarien stützen und anhand derer klären, was in welchem Fall vorzuziehen ist. Eine solche Erstellung ist zum einen sehr aufwendig, zum anderen können Inkonsistenzen auftreten, die den gesamten Optimierungsablauf stören würden.

Wertefunktionen basieren auf der Präferenzordnung zwischen den Produktionsabläufen, weisen also prinzipiell die gleichen Nachteile auf. Hinzu kommt die aufwendige Neukonstruktion der Wertefunktion bei jeder Änderung der Präferenzordnung. Darüber hinaus stellen sie nicht-triviale Anforderungen an die Eigenschaften der Präferenzstruktur, die nach jeder Formulierung der Präferenzen überprüft und ggf. korrigiert werden müßten. Auf diese Weise würde allerdings das Optimierungsziel hinter die Strukturvorschriften des Modells in den Hintergrund rücken. Sinnvoll wäre es jedoch umgekehrt, d.h. wenn sich das Optimierungsmodell den Optimierungszielen anpassen würde.

Satisficing Models weisen die Nachteile im Zusammenhang mit der Definition von Präferenzen nicht auf. Optimierungsziele sind hier einfach über Mengenbedingungen formulierbar. Allerdings fehlt die Vergleichbarkeit von Ergebnissen untereinander. So ist es nicht möglich, bei Vorliegen von zwei Produktionsabläufen, die beide nicht dem *satisficing model* genügen, zu bestimmen, welches das bessere ist. Es fehlt also speziell die Möglichkeit zur Ablage des im Laufe der bisherigen Optimierung errechneten besten Ergebnisses. Falls die Optimierung im Rahmen der vorgegebenen Zeit keinen Produktionsablauf findet, der dem *satisficing model* genügt, kann überhaupt kein Ergebnis der Optimierung geliefert werden.

Aus diesem Grund verwendet diese Arbeit das **Kompromißlösungsmodell**. Es weist nicht die Nachteile im Zusammenhang mit der Formulierung von Präferenzordnungen auf, aber Optimierungsziele sind trotzdem einfach über die Distanzfunktion aufstellbar. Des weiteren erlaubt die Distanzfunktion auch den Vergleich von Produktionsabläufen untereinander, auch über mehrere Szenarien hinweg, zu jedem Zeitpunkt und somit auch das Speichern von Zwischenergebnissen.

Im ersten Schritt müssen die **Kriterien $x_i = f_i$ (y)** festgelegt werden. Dabei ist zu beachten, daß diese Festlegung auf eine Weise erfolgt, daß **größere** Werte x_i **bessere** Kenngrößen bedeuten müssen. Des weiteren müssen die Werte innerhalb derselben Größenordnung liegen, um unerwünschte Verzerrungen auszuschließen[142].

- **Spezielle Fertigungsdurchlaufzeit**: Da diese Kenngröße umso besser ist, je niedriger ihre Ausprägung ausfällt, ist es nötig, sie durch eine Umstellung in der Art x_1 := c – spezielle Fertigungslaufzeit „umzudrehen". Für c kommen entweder eine Vergleichzeit, z.B. die erste berechnete spezielle Fertigungslaufzeit, oder eine andere Konstante in Frage. Der Verfasser entschied sich für die zweite Möglichkeit, da damit die Problematik im Zusammenhang mit negativen Kriteriumsausprägungen, wie sie sich bei Verlängerung der speziellen Fertigungsdurchlaufzeit im Vergleich zur Vergleichszeit im ersten Fall ergeben würde, umgangen wird. Als Konstante wird der durch `real` maximal darstellbare positive Wert, im folgenden mit **m** bezeichnet, gewählt. Auf diese Weise sollte sichergestellt sein, daß die Kenngröße x_1 immer einen positiven Wert annimmt.

  x_1 := m – spezielle Fertigungsdurchlaufzeit

- **spezielle Fertigungslieferterminabweichung**: Auch hier gilt, daß die Kenngröße „umzudrehen" ist. Analog wird definiert:

  x_2 := m – spezielle Fertigungslieferterminabweichung

- **Transportkosten**: Die Kenngröße muß ebenfalls „umgedreht" werden, da eine Minimierung der Transportkosten erfolgen soll:

  x_3 := m – Transportkosten

- **Flächennutzung**: Die Flächennutzung kann sich theoretisch im Bereich von 0% bis 100% bewegen, wobei 100% Flächennutzung das Ideal darstellt. Folglich:

  x_4 := Flächennutzung * m

- **Häufigkeit von Terminverzügen**: Dies sei dahingehend modifiziert, daß die Häufigkeit der Termineinhaltungen verwendet wird:

  x_5 := (Häufigkeit von Termineinhaltungen[143] / Anzahl der Fertigungsaufträge) * m

- **Kapazitätsauslastung**: Da die Auslastung umso besser ist, je höher sie ist, kann sie direkt als Kenngröße übernommen werden:

  x_6 := Kapazitätsauslastung * m

- **gesamte Durchlaufzeit**: Analog zur speziellen Durchlaufzeit wird definiert:

  x_7 := m – gesamte Durchlaufzeit

- **Standardabweichung der Termintreue**: Sie ist umso besser, je geringer sie ausfällt. Es findet wieder die Konstante m Verwendung:

  x_8 := m – Standardabweichung der Termintreue

- **Investitionsausgaben**: Analog zu den Transportkosten:

  x_9 := m - Investitionsausgaben

---

[142] Vgl. Vgl. Yu/Zhang (1992), S. 2679
[143] = Anzahl der Fertigungsaufträge - Häufigkeit von Terminverzügen

Im Anschluß ist der Idealpunkt $x^* = (x_1^*, x_2^*, \ldots x_q^*)$ mit $x_i^* = \sup \{f_i(y): y \in Y\}$ des Lösungsraums Y zu definieren:

- x_1^* := m (ideale spezielle Fertigungsdurchlaufzeit von Null[144]);
- x_2^*:= m (ideale spezielle Fertigungslieferterminabweichung von Null[145])
- x_3^*:= m (utopische Transportkosten in Höhe von Null);
- x_4^*:= m (ideale Flächennutzung von 100%);
- x_5^*:= m (ideal: Alle Fertigungsaufträge wurden hinsichtlich ihrer Termine eingehalten);
- x_6^*:= m (ideale Kapazitätsauslastung von 100%);
- x_7^*:= m (utopische gesamte Durchlaufzeit von Null);
- x_8^*:= m (ideale Standardabweichung der Termintreue in Höhe von Null);
- x_9^*:= m (ideale Investitionsausgaben in Höhe von Null).

Damit läßt sich nach der l_p-Norm für ein $p \geq 1$ die Entfernung r (x, p) von Produktionsabläufen vom Idealpunkt berechnen:

$$r(x, p) = \| x - x^* \| = \left[\sum_{i=1}^{9} | x_i - x_i^* |^p \right]^{1/p}.$$

Die Wahl des Parameters p überlaßt diese Arbeit dem Anwender, der Parameter p ist zu Beginn des Optimierungsprozesses einzugeben. Wie bereits im Exkurs geschildert, sorgt ein Wert von p nahe bei 1 für die Bevorzugung der Summe der Kriterien, während hohe Werte hochausschlagende Abweichungen besonders stark gewichten.

Zur Feinabstimmung soll schließlich noch für den Anwender die Möglichkeit gegeben werden, selbst zu entscheiden, auf welches Kriterium wieviel Wert gelegt wird. Aus diesem Grund wird ein Gewichtungsvektor $v = (v_1, v_2, \ldots v_9)$ eingeführt mit $v_1 + v_2 + \ldots + v_9 = 1$, dessen Werte die Einzelgewichtung der neun Kriterien widerspiegeln sollen, und die vom Anwender ebenfalls zu Beginn des Optimierungsprozesses einzugeben sind. Die Berechnung der Entfernungen ergibt sich dann nach der Formel

$$r(x, p) = \| x - x^* \| = \left[\sum_{i=1}^{9} v_i * | x_i - x_i^* |^p \right]^{1/p}.$$

Als optimaler Produktionsablauf wird dann derjenige ausgewählt, dessen r-Wert entweder einen vorgegebenen und vorher einzustellenden Wert r* unterschreitet oder der am Ende des Optimierungsprozesses, falls kein solcher gefunden wurde, den geringsten Entfernungswert r aufweist. Auf diese Weise ist auch ein Vergleich von Produktionsabläufen verschiedener Szenarien über ihren r-Wert möglich.

---

[144] Sie wird nur erreicht, falls keine Fertigungsaufträge mit positiver Gewichtung definiert wurden; in diesem Fall spielt sie aber im Zuge der Optimierung keine Rolle, da sie für jedes Szenario immer den Wert Null erreicht

[145] analog

4.7 Die Variation der Auftragsterminierung

Wie bereits in Kapitel 3 ausgeführt, ist es Aufgabe des **Auftragsterminierungs-moduls**, durch Veränderung der **Plan-Startzeiten von Arbeitsschritten** eine Teiloptimierung des Produktionsablaufs zu erzielen. Die Optimierung soll sich dabei auf die Erkenntnisse des Auftragsmanagementprüfstands stützen, d.h. gezielt zu versuchen, die vorhandenen **Engpässe** zu umgehen. Auf diese Weise soll nicht nur die Anzahl der Engpässe als Kenngröße reduziert werden, sondern damit verbunden auch die **Durchlaufzeiten** sowie die **Termintreue** (jeweils spezielle und gesamte).

Zu Beginn des Optimierungsprozesses liegen die geplanten Startzeiten aller Fertigungsaufträge und Arbeitsschritte als externe Eingabe vor, wie sie sich nach Anwendung der **Terminplanung** im Rahmen der zum Einsatz gebrachten **PPS-Methode** ergaben. Die Aufgabe der Terminplanung ist es, aufbauend auf den Vorgaben der Arbeitsplanung, Produktionsprogrammplanung und Losgrößen-planung, das Zeitgerüst der Produktion für die Planungsperiode festzulegen. Dazu werden die Start- und Endtermine der einzelnen Arbeitsschritte so bestimmt, daß eine übergeordnete betriebliche Zielsetzung (z.B. Termintreue) erreicht wird. Da die **Realisierbarkeit** gewünschter Terminvorgaben für die Fertigungsaufträge einerseits von der **Kapazitätsinanspruchnahme** der Fertigungseinrichtungen durch die einzelnen Aufträge, andererseits aber auch vom **Kapazitätsangebot** abhängt, müssen die Fertigungstermine auf die vorhandenen Kapazitäten abgestimmt werden. Dies erfolgt in der Regel in zwei Schritten[146]:

(1) **Durchlaufterminierung**: Hier werden die Start- und Endtermine der für die einzuplanenden Arbeitsschritte ohne Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten bestimmt[147]. Dies erfolgt mit Hilfe von statischen Methoden, d.h. das Ergebnis der Durchlaufterminierung ändert sich im folgenden nicht.

(2) **Kapazitätsterminierung**: In diesem Schritt erfolgt die endgültige Terminermittlung unter Berücksichtigung des Kapazitätsangebots und der Kapazitätsnachfrage. Im Normalfall stimmen Kapazitätsangebot und -nachfrage in den einzelnen Perioden des gesamten Planungszeitraums nicht überein. Es ergeben sich vielmehr wechselnde **Unter- und Überauslastungen** an den einzelnen Arbeitssystemen[148] (vgl. Abbildung 46). Die statische Bestimmung der Belastungsprofile aller Arbeitssysteme ist ein hochkomplexer Vorgang, der eine Vielzahl von Wechselwirkungen zu beachten hat. Durch Verwendung des **Auftragsmanagementprüfstands** ist jedoch eine **dynamische Bestimmung** durch Simulation des Produktionsablaufs möglich. Folglich bietet es sich an, die so gewonnenen Erkenntnisse als Basis einer iterativen Kapazitätsterminierung im Rahmen des Optimierungsprozesses zu verwenden. Dies soll im folgenden beschrieben werden.

[146] Vgl. Blohm (1988), S. 275
[147] Vgl. Blohm (1988), S. 276
[148] Vgl. Blohm (1988), S. 286

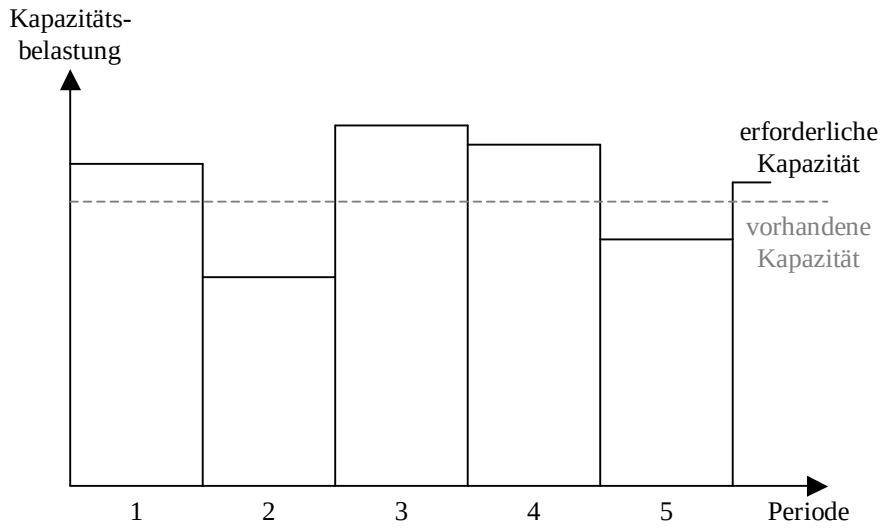

Abb. 46: Belastungsprofil einer Fertigungseinrichtung (Quelle: Blohm (1988), S. 286)

Grundsätzlich existieren drei Gruppen von Maßnahmen zum Ausgleich zwischen Kapazitätsangebot und -nachfrage:

(1) **Anpassung des Kapazitätsbestands an den Bedarf**: Überstunden, Inbetriebnahme von Reservekapazitäten, Kurzarbeit, langfristige Anpassung durch Auf- oder Abbau des Betriebsmittelbestands.

(2) **Anpassung des Kapazitätsbedarfs an den Bestand**: z.B. durch Fremdvergabe von Aufträgen.

(3) **Kapazitätsabgleich**: Verschieben von Aufträgen aus Perioden mit Überbelastung in Perioden mit freien Kapazitäten[149].

Die ersten beiden aufgeführten Maßnahmen sind organisatorischer Natur. Ihre Erfassung im Rahmen des Produktionsoptimierungsprozesses ist insofern möglich, als daß durch Generieren **möglicher Szenarien**, wie sie sich nach Durchführung einer solchen Anpassungsmaßnahme ergeben, ein Vergleich gezogen werden kann.

Beim Kapazitätsabgleich durch Verlagerung von Arbeitsschritten aus Engpaßperioden in Perioden mit Leerzeiten müssen auch die Auswirkungen auf die Terminplanung anderer Fertigungsaufträge berücksichtigt werden[150]. Aus diesem Grund muß zuerst ein Modell geschaffen werden, in dem die gegenseitigen Wechselwirkungen erfaßt sind. Ein Verfahren, welches die Ablaufstruktur der Produktion erfaßt und sich auch für schwierige und komplexe Terminplanungen eignet[151] und dabei theoretisch solide fundiert ist[152], ist die **Netzplantechnik**.

[149] Vgl. Blohm (1988), S. 287
[150] Vgl. Blohm (1988), S. 287
[151] Vgl. Corsten (1992), S. 403 und Blohm (1988), S. 278
[152] Vgl. Schwarze (1990), S. 25ff.

Exkurs: Netzplantechnik

Ein **Netzplan** ist ein gerichteter Graph, bestehend aus einer Folge von Pfeilen, die jeweils zwei Knoten miteinander verbinden. Ausprägungsformen lassen sich in die Typen Vorgangspfeilnetzplan (Vorgänge werden durch Pfeile dargestellt), Vorgangs-Knotennetzplan (Vorgänge werden durch Knoten symbolisiert) und Ereignisknotennetzplan (Ereignisse werden beschrieben und durch Knoten dargestellt) untergliedern. Im folgenden werden Vorgangspfeilnetzpläne in Form von **CMP-Netzplänen** verwendet. Für sie gelten folgende Grundregeln:

(1) Ein Pfeil symbolisiert einen Vorgang, ein Knoten ein Ereignis; jeder Pfeil beginnt und endet an einem Knoten.

(2) Bevor ein Vorgang, dessen Pfeil einem Knoten A entspringt, beginnen kann, müssen alle Vorgänge, deren Pfeile zu A führen, beendet worden sein.

(3) Zwei Knoten dürfen nur durch *einen* Pfeil miteinander verbunden sein; verlaufen zwei Vorgänge parallel, so muß ein Scheinvorgang mit einer Ablaufzeit von Null und ein weiteres Ereignis eingeführt werden.

(4) Zyklen sind nicht zugelassen[153].

Für jeden Vorgang wird seine Zeitdauer D im Netzplan abgelegt. Sie ergibt sich aus der Summe der Rüst- und der Bearbeitungszeit des betreffenden Arbeitsschritts. Deneben wird für jedes Ereignis i der frühestmögliche Eintrittszeitpunkt FZ(i) sowie der spätestmögliche Eintrittszeitpunkt SZ(i) ermittelt.

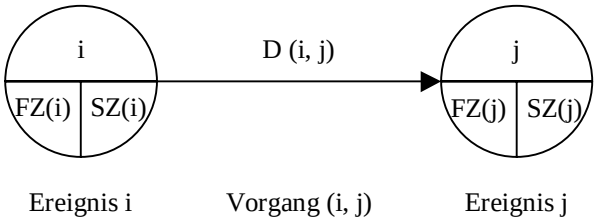

Abb. 47: Aufbaustruktur der Netzplansymbole (Quelle: Blohm (1988), S. 282)

Um den zeitlichen Ablauf der Fertigung sowie alle möglichen Endtermine und Pufferzeiten festzustellen, wird der **Strukturplan der Fertigung** erstellt. Dazu werden die Daten der Arbeitspläne herangezogen, aus denen sich die Daten der Arbeitsschritte einschließlich Rüst- und Bearbeitungszeiten sowie Vorgängern ergeben. Der Strukturplan enthält für alle Fertigungsaufträge die zugehörigen, gemäß den Arbeitsplänen untereinander vernetzten Arbeitsschritte.

Die **frühestmöglichen Eintrittszeitpunkte** des Arbeitsschritts j ergeben sich aus den frühestmöglichen Eintrittszeitpunkten der unmittelbaren Vorgänger i sowie der jeweiligen Vorgangsdauer D(i, j) nach:

$$FZ(j) = \max_i \{FZ(i) + D(i, j)\}$$

[153] Vgl. Blohm (1988), S. 280f.

Der frühestmögliche Eintrittszeitpunkt eines Arbeitsgangs ohne direkten Vorgänger wird gleich dem geplanten Startzeitpunkt des zugehörigen Fertigungsauftrags gesetzt.

Der **spätestmögliche Eintrittszeitpunkt** des letzten Ereignisknotens eines Fertigungsauftrags wird gleich dem Ablieferungstermin gesetzt. In einer Rückwärtsrechnung werden dann davon ausgehend die jeweils spätestmöglichen Eintrittszeitpunkte der vorhergehenden Ereignisse errechnet:

$$SZ(i) = \min_j \{SZ(j) - D(i, j)\}$$

Die Ermittlung des frühestmöglichen Anfangs- (FAZ) und Endzeitpunkts (FEZ) sowie spätestmöglichen Anfangs- (SAZ) und Endzeitpunkts (SEZ) **bezogen auf einen Vorgang** (i, j) ergeben sich nach folgenden Formeln:

$$\begin{aligned} FAZ(i, j) &= FZ(i) \\ FEZ(i, j) &= FAZ(i, j) + D(i, j) \\ SEZ(i, j) &= SZ(j) \\ SAZ(i, j) &= SEZ(i, j) - D(i, j)^{154} \end{aligned}$$

Der **kritische Weg** im Netzplan ist die Folge derjenigen Arbeitsschritte, deren lückenlose Folge den längsten Weg durch den Netzplan bildet. Eine Nichteinhaltung der Zeitvorgaben auf diesem Weg führt zu einer Verschiebung des geplanten Endtermins[155].

Aus dem so erstellten Netzplan lassen sich folgende Pufferzeiten ableiten[156]:

(1) Der **Gesamtpuffer** GP(i, j) = SAZ(i, j) – FAZ(i, j) gibt die Zeit an, innerhalb welcher der Starttermin eines einzelnen Arbeitsschritts verschoben werden kann, ohne den Endtermin des Projekts zu gefährden. Dies bedeutet, daß dann, wenn der Vorgang zum Zeitpunkt FAZ beginnt, seine Dauer um den Gesamtpuffer überschritten werden kann, ohne daß hierdurch die Gesamtdauer aller Vorgänge (d.h. des gesamten Fertigungsauftrags) überschritten werden muß[157].

(2) Die **freie Pufferzeit** FP(i, j) = FZ(j) – FZ(i) – D(i, j) gibt an, inwieweit sich ein Vorgang gegenüber seinem frühestmöglichen Anfangszeitpunkt verschieben läßt, ohne damit die frühestmöglichen Anfangszeitpunkte nachfolgender Arbeitsgänge zu beeinflussen. Der freie Puffer eines Vorgangs wird folglich unter der Prämisse berechnet, daß der Vorgang selbst zum frühestmöglichen Zeitpunkt beginnt, aber dabei die frühestmöglichen Anfangszeitpunkte seiner unmittelbaren Nachfolger sicherstellt[158].

Ende des Exkurses.

[154] Vgl. Blohm (1988), S. 282f.
[155] Vgl. Blohm (1988), S. 283
[156] Vgl. Blohm (1988), S. 286
[157] Vgl. Corsten (1992), S. 408
[158] Vgl. Corsten (1992), S. 408

Zum Kapazitätsabgleich im Rahmen des Produktionsoptimierungssystems müssen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

(1) Bei welchen Fertigungsaufträgen wurden Terminüberschreitungen festgestellt?

(2) Welche der Arbeitsschritte sind an einem solchen Terminverzug **aufgrund eines Engpasses** beteiligt?

(3) Gibt es für die so ermittelten Arbeitsvorgänge Pufferzeiten, innerhalb derer sie sich nach den Ausführungen des Exkurses zur Netzplantechnik **nach hinten** verschieben lassen?

(4) Sind innerhalb dieser Pufferzeiten freie Kapazitäten verfügbar?

(5) Falls nicht, gibt es ggf. freie Kapazitäten **vor** dem geplanten Startzeitpunkt, in welche der betreffende Arbeitsschritt verschiebbar wäre?

(6) Welche Auswirkungen ergeben sich dann auf die Starttermine der anderen Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags?

Um eine möglichst feine Abstimmung des Kapazitätsausgleichs zu ermöglichen, erfolgt **pro Aufruf** des Moduls zur Auftragsterminierung nur die Veränderung des Starttermins von **maximal einem** einzigen **Arbeitsschritt**. Auf diese Weise lassen sich die Auswirkungen einer derartigen Veränderung genau erfassen und zuordnen. Es wird ferner davon ausgegangen, daß beim Aufruf des Moduls die **Netzplanstruktur** des betrachteten Szenarios bereits vorliegt.

4.7.1 Auswahl des Fertigungsauftrags mit der relevantesten Terminabweichung

Durch Aufruf des Auftragsmanagementprüfstands wurde für jedes Arbeitssystem ermittelt, innerhalb welcher Zeiträume eine Überlast vorliegt (vgl. Abschnitt 4.5.3). Des weiteren wurden für alle Fertigungsaufträge die individuellen Terminabweichungen berechnet (vgl. Abschnitt 4.5.2). Durch Iteration über die Menge der Fertigungsaufträge kann auf diese Weise die **betragsmäßig** größte Abweichung ermittelt werden. Allerdings soll zusätzlich die **Bedeutung** eines Fertigungsauftrags für das Unternehmen in den Kapazitätsausgleich miteinbezogen werden[159]. Aus diesem Grund wird die Menge der Fertigungsaufträge gemäß ihrer Gewichtungsklassen abgearbeitet (vgl. Abbildung 44 und die Ausführungen in Abschnitt 4.6 hierzu). Genauer wird zuerst versucht, die Terminabweichung der Fertigungsaufträge mit einer hohen Gewichtung zu reduzieren, anschließend die der Fertigungsaufträge mit mittlerer Gewichtung, dann mit niedriger Gewichtung und schließlich die Terminabweichung alle verbleibenden. Abbildung 48 gibt das Auswahlverfahren des nächsten zu behandelnden Fertigungsauftrags wieder.

4.7.2 Ermittlung des Arbeitsschritts mit dem höchsten Terminverzug aufgrund eines Engpasses

Nachdem auf diese Weise ein Fertigungsauftrag bestimmt wurde, muß überprüft werden, ob bei der Durchführung seiner Arbeitsschritte ein Engpaß vorlag. Dies wird erreicht, indem für jeden Arbeitsschritt des Fertigungsauftrags die individuelle Terminabweichung betrachtet wird. Falls sie betragsmäßig größer als Null ist, wird überprüft, ob auf dem Arbeitssystem, auf welchem der Arbeitsschritt durchgeführt

[159] Ein ähnlicher Ansatz findet sich bei Blohm (1988), S. 289

wurde, zu dem betreffenden Zeitpunkt ein Engpaß vorlag. Um den Kapazitätsausgleich auch an dieser Stelle mit den relevantesten Vorgängen durchzuführen, erfolgt zunächst eine abfallende Sortierung der Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags hinsichtlich des Betrags ihrer Terminabweichung. Anschließend wird für den Arbeitsschritt mit der höchsten Terminabweichung der Test auf das Vorhandensein eines Engpasses durchgeführt, dann für den Arbeitsschritt mit der zweithöchsten, falls zuvor kein Engpaß erkannt wurde, dann für den dritthöchsten usw. (vgl. Abbildung 49). Falls sich kein solcher Arbeitsschritt finden läßt, wird der betreffende Fertigungsauftrag aus der Liste der zu betrachtenden Fertigungsaufträge entfernt und ein anderer gemäß des Verfahrens aus Abschnitt 4.7.1 ausgewählt.

```
// Annahme: Die Menge der Fertigungsauftraege sei in der Liste FertListe
// abgelegt

Setze gewichtung := 3, gefunden := NULL

do

   Setze max_abweichung := -1;

   Iteriere über FertListe

      Es sei Fert der nächste Fertigungsauftrag aus FertListe

      if Fert.gewichtung = gewichtung then

         if |Fert.terminabweichung| >= max_abweichung then

            Setze gefunden := Fert,
                  max_abweichung := |Fert.terminabweichung|

         end if
      end if

   if gefunden = NULL then

      gewichtung := gewichtung – 1;

   else

      return gefunden

   end if

while gewichtung >=0

return NULL
```

Abb. 48: Auswahl des Fertigungsauftrags für den Kapazitätsabgleich

4.7.3 Ermittlung der verfügbaren Pufferzeiten des selektierten Arbeitsschritts

Dies geschieht auf Grundlage des Netzplans des Szenarios. Wie bereits ausgeführt, wird davon ausgegangen, daß zu Beginn des Optimierungsprozesses der Netzplan des Szenarios inklusive Berechnung der freien Puffer sowie der Gesamtpuffer gemäß den Vorschriften des Exkurses zur Netzplantechnik aufgestellt wurde.

```
// Annahme: Die Menge der Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags Fert sei
// in der Liste SchrittListe abgelegt

Sortiere Schrittliste nach dem Betrag des Attributs terminAbweichung
   abfallend (so dass der Arbeitsschritt mit der betragsmäßig
   höchsten Abweichung das erste Element der Liste ist usw.)

Iteriere über die sortierte SchrittListe

   Es sei Schritt der nächste Arbeitsschritt in SchrittListe

   if |Schritt.terminAbweichung| > 0 then

      // Stelle fest, ob der Bearbeitungszeitraum von Schritt in einen
      // Engpass des zugehörigen Arbeitssystems fällt

      Setze Arbeitssystem := Schritt.arbeitssystem

      if (Schritt.istStart + Schritt.durchlaufzeit)
         ∈ (Arbeitssystem.Engpaesse) then

         return Schritt

      end if
   end if

return Null
```

Abb. 49: Auswahl des Arbeitsschritts mit dem höchsten Terminverzug aufgrund eines Engpasses

Zum Speichern der Pufferbestände sowie der frühest- und spätestmöglichen Anfangs- und Endzeitpunkte wird die Klasse `Arbeitsschritt` um die Attribute `faz`, `saz`, `fez`, `sez`, `freierPuffer` und `gesamtPuffer` erweitert:

Arbeitsschritt	
auftrag	:Auftrag
arbeitsgangNummer	:integer
menge	:real
produkt	:Produkt
arbeitssystem	:Arbeits-system
ruestZeit	:Zeitdauer
prozessZeit	:Zeitdauer
sollStart	:Datum
sollEnde	:Datum
fahrplan	:Fahrplan
istStart	:Datum
durchlaufzeit	:Zeitdauer
terminAbweichung	:Zeitdauer
faz, saz	:Datum
fez, sez	:Datum
freierPuffer, gesamtPuffer	:Zeitdauer

Abb. 50: Die Klasse `Arbeitsschritt` *mit den Attributen aus der Netzplantechnik*

4.7.4 Die Ermittlung freier Kapazitäten innerhalb der Pufferzeiten, Verschieben des Arbeitsschritts

Die Ermittlung freier Kapazitäten einzelner Arbeitssysteme zu bestimmten Zeitpunkten ist insofern schwierig, als daß vom Auftragsmanagementprüfstand nur die aggregierte Auslastung über den gesamten betrachteten Zeitraum hinweg berechnet wird. Allerdings kann vom **Nichtvorhandensein** eines Engpasses in erster **Näherung** auf eine Unterauslastung geschlossen werden. Der Verfasser ist sich bewußt, daß die Verwendung dieser Näherung nicht den Idealzustand darstellt. Eine zukünftige Ergänzung könnte also darin bestehen, für die einzelnen Arbeitssysteme ihre Auslastung in Form eines Belastungsprofils (vgl. Abbildung 46) abzuspeichern.

Abbildung 51 gibt die Vorgehensweise zur Bestimmung freier Kapazitäten unter Verwendung der soeben dargelegten Näherungsmethode wieder.

```
// Annahme: Der in Abschnitt 4.7.2 ermittelte Arbeitsschritt sei in
// Schritt abgelegt, seine Pufferzeiten seien bekannt.

// Es sei d die reine Bearbeitungszeit von Schritt:
Setze d:= Schritt.ruestZeit + Schritt.processZeit

if ∃ ein Zeitintervall t so, daß
   |t| = d,
   {t} ∩ Schritt.arbeitssystem.engpaesse = ∅
   und t beginnt in Schritt.freierPuffer then

   Setze Schritt.sollStart := auf den Beginn von t

elsif ∃ ein Zeitintervall t so, daß
   |t| = d,
   {t} ∩ Schritt.arbeitssystem.engpaesse = ∅
   und t beginnt in Schritt.gesamtPuffer then

   Setze Schritt.sollStart := auf den Beginn von t

endif
```

Abb. 51: Kapazitätsabgleich unter Verwendung von Pufferzeiten

Dabei wird zunächst versucht, den Arbeitsschritt innerhalb des freien Puffers zu verschieben, da dieser die frühestmöglichen Startzeitpunkte der anderen Arbeitsschritte unberührt läßt[160]. Falls keine solche Verschiebung möglich ist, wird der Gesamtpuffer herangezogen. Durch ihn verändert sich die geplante Fertigstellung des Fertigungsauftrags nicht, wohl aber werden die freien Puffer der anderen Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags beeinflußt[161].

4.7.5 Das Vorziehen eines Arbeitsschritts und die Auswirkungen auf die gesamte Fertigung

Falls nach den Vorschriften von Abschnitt 4.7.4 durch Ausnutzung der Pufferzeiten des Arbeitsschritts **keine** Verlegung in ein Zeitintervall mit Unterauslastung möglich

[160] Vgl. Corsten (1992), S. 408
[161] Vgl. Corsten (1992), S. 408

war, so soll versucht werden, den Arbeitsschritt über seinen frühestmöglichen Startzeitpunkt hinaus **nach vorne** in eine Periode mit Unterauslastung zu verlegen, um so den Engpaß zu umgehen. Dabei müssen auch die frühest- und spätestmöglichen Zeitpunkte der restlichen Arbeitsschritte des Fertigungsauftrags angepaßt werden, die sie gemäß den Vorschriften der Netzplantechnik voneinander abhängen.

Es sei folgender beispielhafter Fertigungsauftrag, bestehend aus sechs Arbeitsschritten, betrachtet:

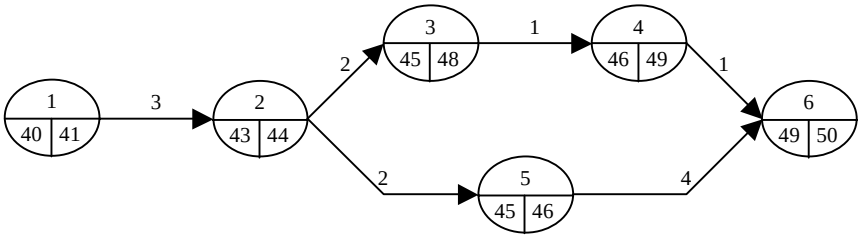

Abb. 52: Beispiel: Fertigungsauftrag

Der Lieferungstermin des Fertigungsauftrags sei t=50. Im Zuge der Rückwärtsterminierung ergeben sich die spätestmöglichen Eintrittszeitpunkte gemäß $SZ(i) = \min_j \{SZ(j) - D(i, j)\}$. Die frühestmöglichen Eintrittszeitpunkte der Arbeitsschritte ergeben sich aus den frühestmöglichen Eintrittszeitpunkten der unmittelbaren Vorgänger i sowie der jeweiligen Vorgangsdauer D(i, j) nach $FZ(j) = \max_i \{FZ(i) + D(i, j)\}$. Der frühestmögliche Startzeitpunkt des ersten Knotens ist dabei gleich dem geplanten Startzeitpunkt des Fertigungsauftrags t=40 gesetzt worden (vgl. Exkurs zur Netzplantechnik).

Es soll sich nun aus den Simulationsdaten folgender Ist-Ablauf ergeben haben: Arbeitsschritt (5, 6) wurde zum Zeitpunkt t=45 ausgeführt. Da das betreffende Arbeitssystem jedoch überlastet war und somit ein Engpaß vorlag, verlängert sich die Durchführungszeit des Arbeitsschritts (5, 6) um ε=5 Zeiteinheiten.

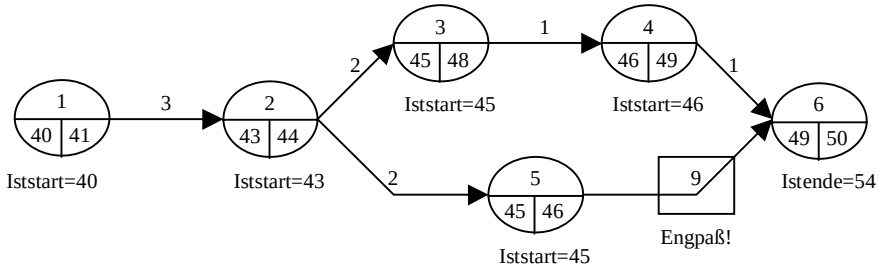

Abb. 53: Beispiel: Fertigungsauftrag mit Engpaß

Offensichtlich ist die Einhaltung des geplanten Endtermins für den Fertigungsauftrag zum Zeitpunkt t=50 nicht mehr realisierbar. Es könnte nun versucht werden, durch Ausnutzen des Puffers in Knoten 5 den Vorgang (5, 6) auf den Zeitpunkt t=46 zu verschieben (vgl. Abschnitt 4.7.3 und 4.7.4), verbunden mit der Hoffnung, daß zum Zeitpunkt t=46 das betreffende Arbeitssystem nicht mehr überlastet ist. Zum Zeitpunkt t=46 liege nun aber ebenfalls ein Engpaß vor. Aus diesem Grund soll der Arbeitsschritt (5, 6) nun auf den Zeitpunkt t=42 vorgezogen werden, in dem, wie das

Produktionsoptimierungssystem ermittelt, keine Überlast vorliegt. Dies kann jedoch nur erfolgen, falls zum Zeitpunkt t=42 die Arbeitsschritte (1, 2) und (2, 5) bereits beendet sind:

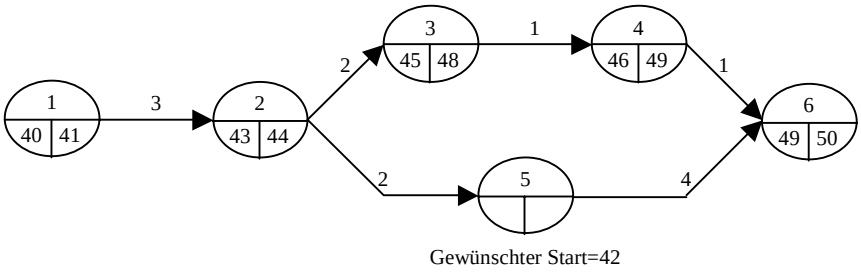

Abb. 54: Beispiel: Fertigungsauftrag mit Engpaß

Es wird FZ(5) := SZ(5) := Sollstart(5) = 42 gesetzt. Im Zuge einer Neuberechnung der Netzplanstruktur, basierend auf den Vorschriften der Vorwärts- und Rückwärts-terminierung, ergibt sich dann:

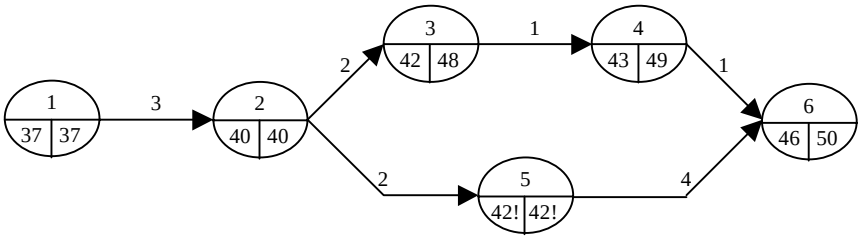

Abb. 55: Beispiel: Fertigungsauftrag vorgezogenem Arbeitsschritt (5, 6)

Die so erhaltenen neuen Startzeitpunkte der Vorgänger (1, 2) und (2, 5) des vorgezogenen Arbeitschritts (5, 6) werden anschließend in die Plandaten der Fertigung übernommen (`Arbeitsschritt.sollStart` := ...).

Die Wahl der Distanz z, um welche der Arbeitsschritt nach vorne gezogen werden soll, hängt dabei wieder von den vorhandenen Perioden mit Unterauslastung ab. Da durch das Voranziehen von Arbeitsschritten Kapital im Fertigungsprozeß in Form von **Inputs** gebunden wird, ist es wünschenswert, die Distanz z so gering wie noch möglich zu wählen (vgl. Abbildung 56).

Es sei angemerkt, daß sich die in diesem Abschnitt vorgestellte Optimierung durch Vorziehen **nicht** negativ auf die Durchlaufzeit des gesamten Fertigungsauftrags auswirkt, solange die Distanz z betragsmäßig geringer ist als die durch den Engpaß verursachte Terminüberschreitung ε. Falls z größer als ε wird, so verlängert sich die **Durchlaufzeit** des Fertigungsauftrags, seine **Termintreue** verbessert sich jedoch. Aufgrund der ggf. unterschiedlichen Präferenzen bei Anwendung des Optimierungs-systems soll aus diesem Grund die Möglichkeit bestehen, auf die Optimierung durch Vorziehen eines Arbeitsschritts wahlweise allgemein zu verzichten.

```
// Annahme: Der in Abschnitt 4.7.2 ermittelte Arbeitsschritt sei in
// Schritt abgelegt.

// Es sei d die reine Bearbeitungszeit von Schritt:
Setze d:= Schritt.ruestZeit + Schritt.processZeit

if ∃ ein Zeitintervall t so, daß
   |t| = d,
   {t} ∩ Schritt.arbeitssystem.engpaesse = ∅
   und t beginnt vor Schritt.sollStart then

      Setze Schritt.sollStart := auf den Beginn von t

endif
```

Abb. 56: Kapazitätsabgleich durch Vorziehen eines Arbeitsschritts

4.7.6 Konzeption des Auftragsterminierungsmoduls

Zusammenfassend ergibt sich folgender konzeptioneller Aufbau des Auftragsterminierungsmoduls:

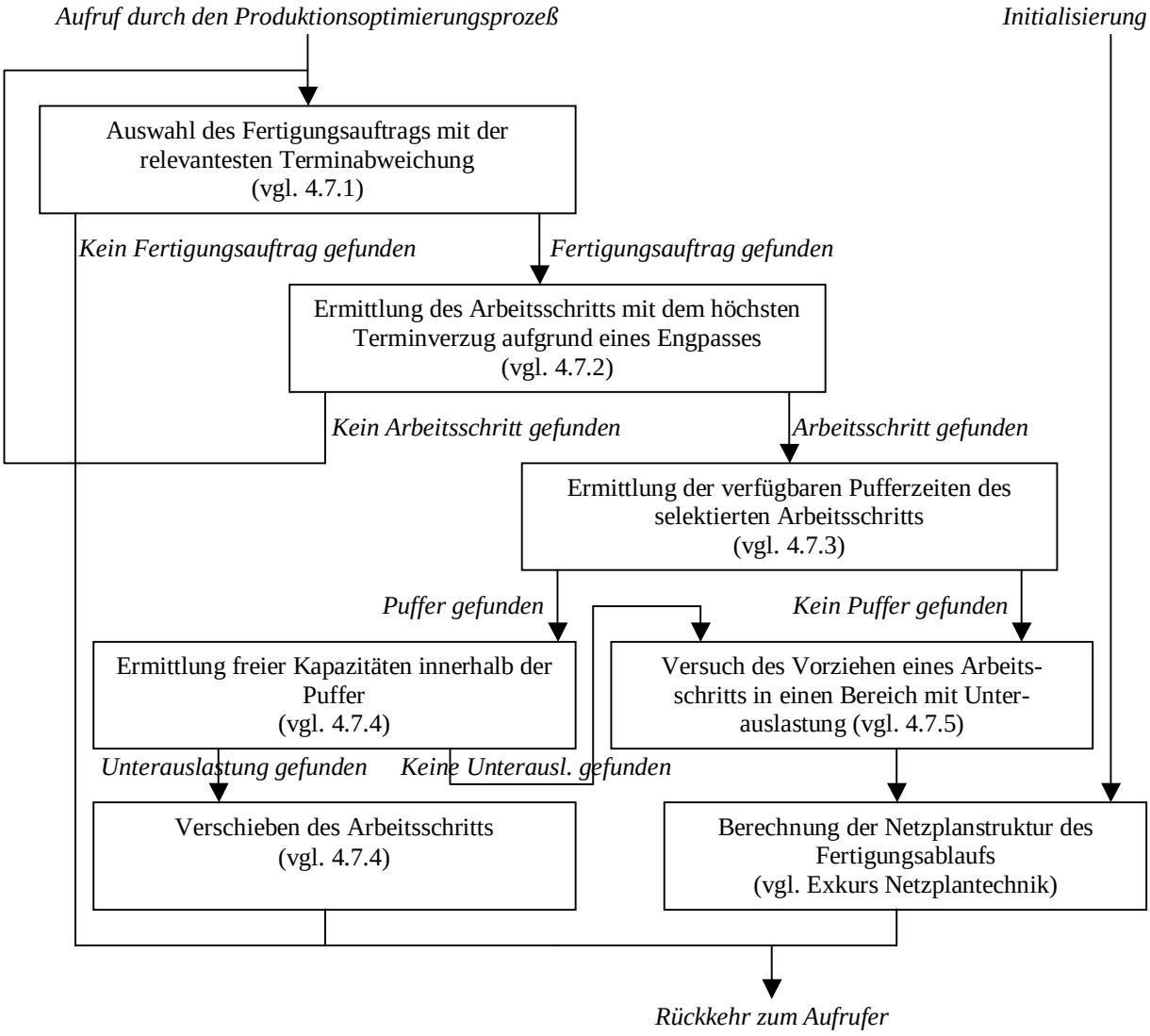

Abb. 57: Konzeption des Auftragsterminierungsmoduls

Das Auftragsterminierungsmodul wird einmalig zur Initialisierung der Netzplanstruktur und anschließend iterativ innerhalb des Produktionsoptimierungsprozesses zur Kapazitätsanpassung aufgerufen.

Bei der Verwendung zum Kapazitätsabgleich wird als erstes derjenige Fertigungsauftrag bestimmt, welcher das größte Optimierungspotential hinsichtlich Bedeutung und Terminverzug aufweist. Wird überhaupt kein Fertigungsauftrag zur Optimierung gefunden, so erfolgt der Rücksprung aus dem Modul zum Aufrufer. Falls doch, wird im nächsten Schritt derjenige Arbeitsschritt innerhalb des Fertigungsauftrags bestimmt, welcher den größten Terminverzug aufgrund eines Engpasses an einem Arbeitssystem aufweist. Der Kapazitätsabgleich soll an diesem Arbeitsschritt ansetzen. Wird kein solcher Arbeitsschritt gefunden, versucht das Auftragsterminierungsmodul, einen anderen Fertigungsauftrag zu bestimmen, der optimiert werden kann.

Der eigentliche Kapazitätsabgleich erfolgt durch Betrachtung der Puffer, die der Arbeitsschritt aufweist. Falls die Möglichkeit besteht, Puffer auszunutzen, wird der Startzeitpunkt des Arbeitsschritts innerhalb des Pufferbereichs nach hinten in einen Bereich mit Unterauslastung verlegt, um so dem Engpaß auszuweichen. Falls dies nicht möglich ist, da entweder keine Puffer für den betreffenden Arbeitsschritt oder keine Bereiche mit Unterauslastung gefunden werden können, wird versucht, den Arbeitsschritt in einen Bereich mit Unterauslastung vorzuziehen (falls vorher nicht festgelegt wurde, daß auf diese Art der Optimierung verzichtet werden soll). Dabei wird der Arbeitsschritt ggf. vor seinen frühest möglichen Starttermin angesetzt, so daß die Netzplanstruktur anschließend neu berechnet werden muß, um Inkonsistenzen zu beseitigen.

5. Integration

5.1 Modularer Aufbau des Produktionsoptimierungssystems

Im vorangegangenen Kapitel 4 wurden die einzelnen Konzepte, auf die sich der Produktionsoptimierungsprozeß stützt, vorgestellt. Die Frage, welche jetzt beantwortet werden soll, lautet: „Auf welche Weise werden die Einzelkonzepte miteinander verbunden, so daß daraus das Produktionsoptimierungssystem gebildet wird?“ Es ist also zu bestimmen, wie

- Optimierungsstrategie,
- Fabriklayoutplanung,
- Auftragsmanagementprüfstand,
- Auftragsterminierung,
- Kennzahlengenerierung
- sowie Bewertung

zusammenwirken sollen. Die **Grundphilosopie** dabei soll lauten, daß das Produktionsoptimierungssystem selbst ebenfalls in höchsten Maß **flexibel** ausgestaltet sein soll, um so den Einsatz unter verschiedensten Rahmenbedingungen, auch unter dem Aspekt der Wandlungsfähigkeit, gewährleisten zu können. Zu diesem Zweck soll das Produktionsoptimierungssystem aus einzelnen **Modulen** aufgebaut sein, die gegen andere Module mit gleicher/ähnlicher Funktionalität austauschbar sind, wobei das Gesamtsystem in seiner Arbeitsfähigkeit nicht beeinflußt wird. So soll es beispielsweise möglich sein, falls ein neues, besonders leistungsfähiges Fabriklayoutsystem verfügbar wird, die Ersetzung des bisher verwendeten Fabriklayoutplanungsmoduls durch das neue Modul nur unter Anpassung der Schnittstellen durchzuführen (vgl. auch Kapitel 5.3 – Datenaustausch).

Kernstück des Produktionsoptimierungssystems ist die **Optimierungsstrategie** (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). In ihr erfolgt die Auswahl und Ansteuerung der Teilsysteme **Fabriklayoutplanung** und **Auftragsterminierung**, in welchen die einzelnen Optimierungsschritte ausgeführt werden.

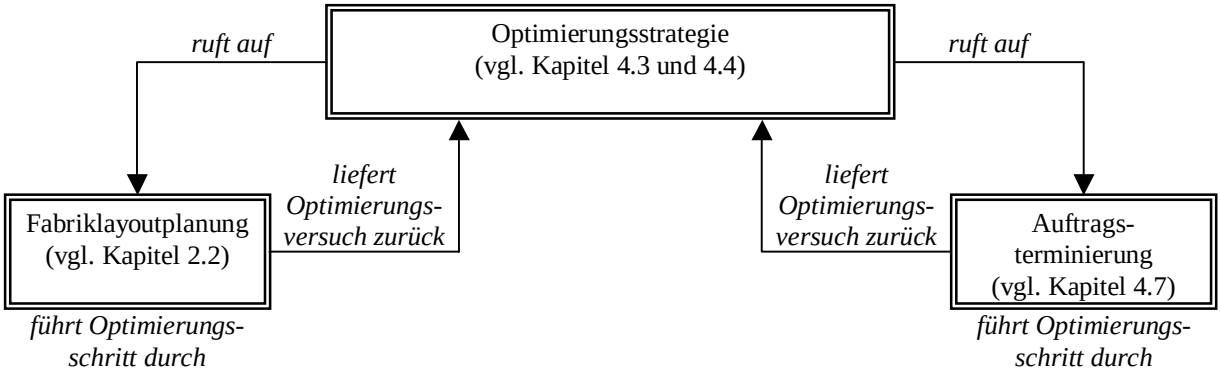

Abb. 58: Aufruf der Teilsysteme durch die Optimierungsstrategie

Die Ergebnisse der Teilsysteme (Optimierungsversuche) müssen nun hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden. Dazu ist zunächst die **Simulation** des Produktionsablaufs durch den Auftragsmanagementprüfstand nach der nun veränderten Aufbau- bzw. Ablaufplanung nötig.

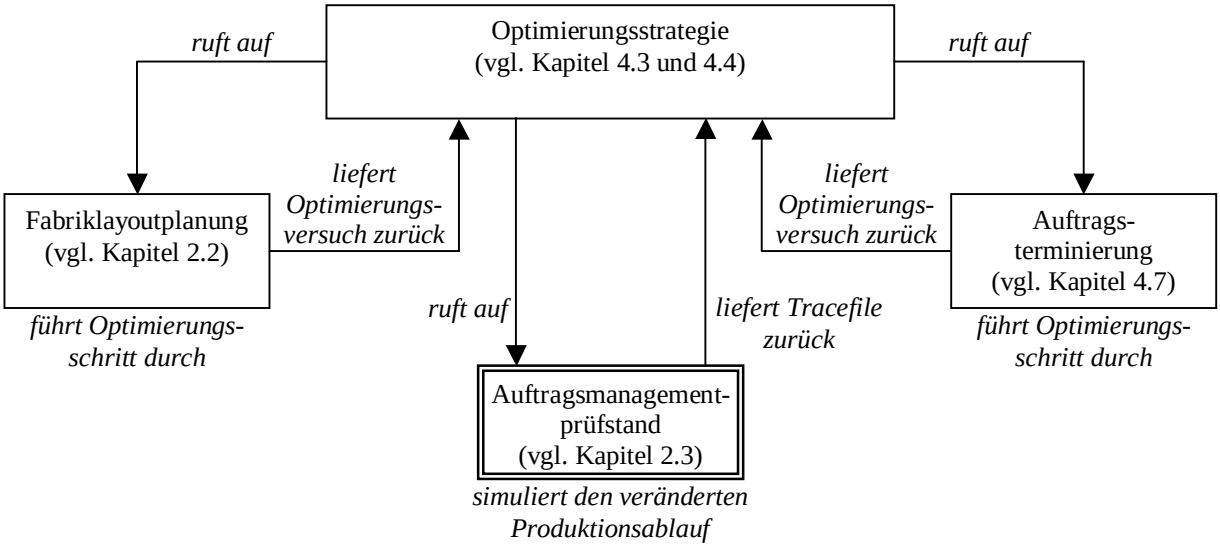

Abb. 59: Simulation des veränderten Produktionsablaufs durch den Auftragsmanagementprüfstand

Vom Auftragsmanagementprüfstand werden in Form des „*tracefiles*“ Angaben darüber geliefert, wann im Rahmen des Produktionsablaufs welche Operation wo durchgeführt wurde. Aus diesen Rohdaten müssen aussagekräftigere Kenngrößen abgeleitet werden.

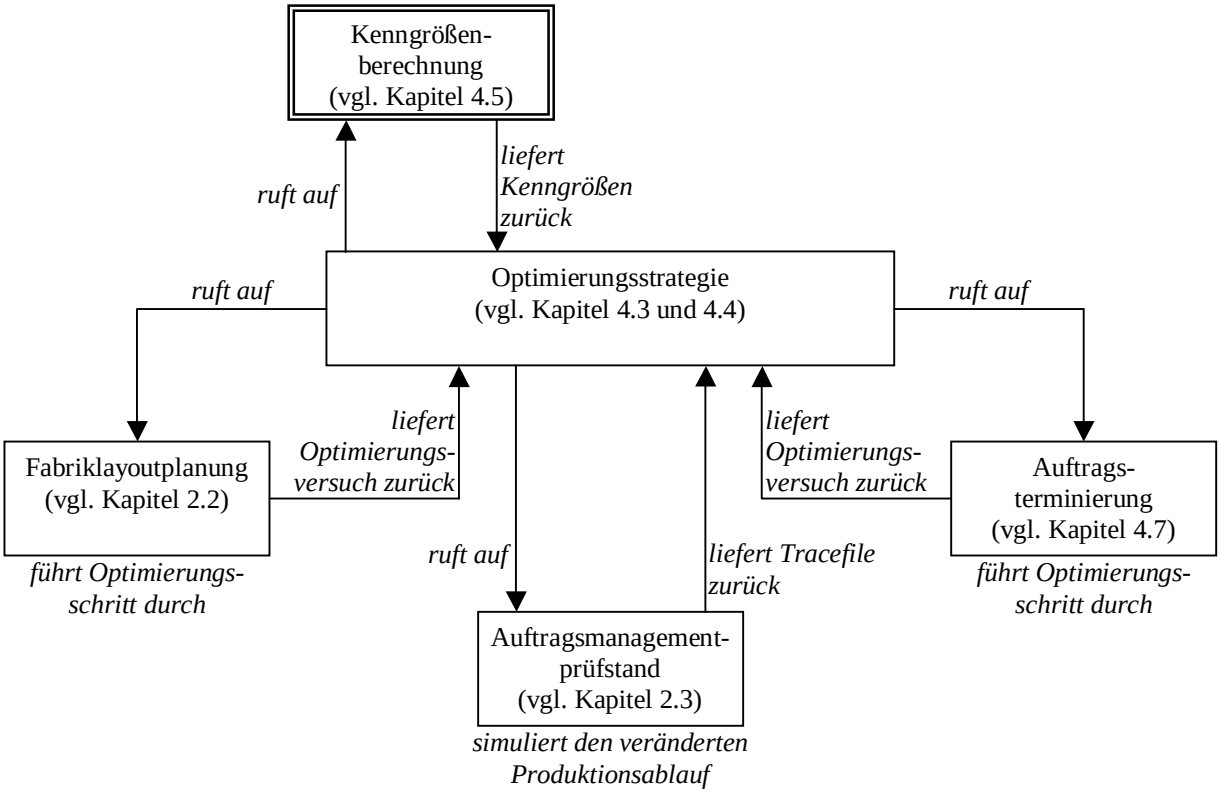

Abb. 60: Einbindung des Moduls zur Generierung der Kenngrößen aus den Simulationsdaten

Die so erhaltenen Kenngrößen des Produktionsablaufs müssen bewertet werden, um die Einordnung des gegenwärtig betrachteten Produktionsablaufs in die Menge aller bisher untersuchten Produktionsabläufe hinsichtlich seiner Qualität zu ermöglichen. Dies ist Aufgabe des **Bewertungsmoduls**.

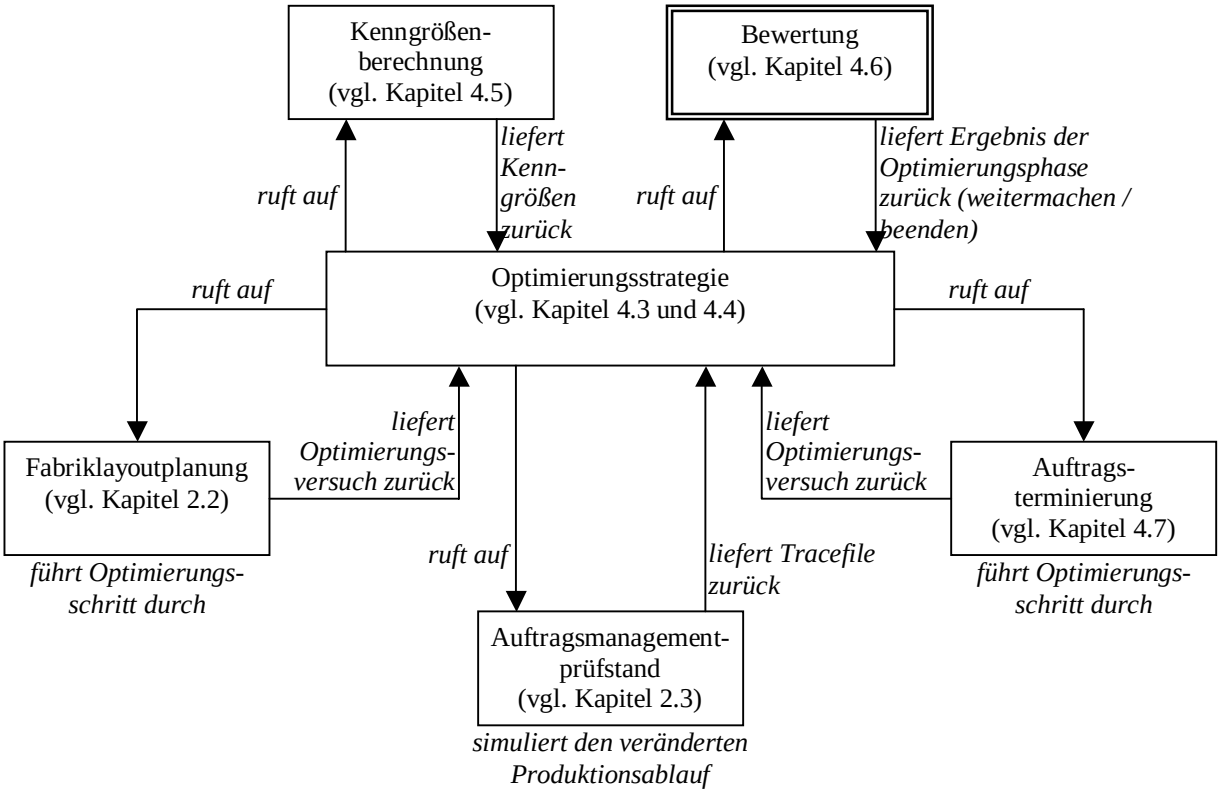

Abb. 61: Bewertung des Produktionsablaufs durch das Bewertungsmodul

Das Bewertungsmodul führt eine Bewertung des gegenwärtigen Produktionsablaufs, basierend auf den generierten Kennzahlen, durch (Berechnung des r-Wertes, vgl. Kapitel 4.6). Falls der berechnete Produktionsablauf der bislang qualitativ beste ist, wird er als Maßstab für zukünftige Vergleiche abgelegt. Falls er das zuvor festgelegte Optimalitätskriterium erfüllt, wird der Produktionsoptimierungsprozeß beendet und der Produktionsablauf als Ergebnis der Optimierung zurückgeliefert. Andernfalls erfolgt der Aufruf des nächsten Optimierungsschritts (vgl. Abbildung 58). Als zusätzliches Abbruchkriterium kann noch eine obere Schranke für die Anzahl der auszuführenden Optimierungsschritte angegeben werden (alternativ eine Schranke für die aufsummierte Ablaufzeit des Produktionsoptimierungsprozesses). Bei Erreichen dieser Schranke bricht der Produktionsoptimierungsprozeß ebenfalls ab, wobei hier dann das bislang beste Zwischenergebnis der Optimierung als Endergebnis zurückgeliefert wird.

5.2 Datenintegration

Das Produktionsoptimierungssystem stützt sich bei seiner Arbeitsweise auf eine Reihe von **Daten**, die in den Kapiteln 3 und 4 eingeführt und mit Hilfe von Klassendiagrammen beschrieben wurden. Allerdings wird nicht von jedem Modul die gleiche Menge von Daten verwendet. Des weiteren ergibt sich vor dem Hintergrund, daß das in Kapitel 2.2 beschriebene Fabriklayoutplanungssystem sein eigenes Datenmodell verwendet und diese Daten separat in einer relationalen Datenbank

ablegt, die Problemstellung, daß Daten teilweise mehrfach gehalten werden und daher gegenseitig zu synchronisieren sind. Tabelle 3 zeigt die Teilsysteme des Produktionsoptimierungssystems einschließlich ihrer notwendigen Daten auf:

Teilsystem (Modul)	*benötigte Daten*
Fabriklayoutplanung	Produktionsstätte, Arbeitssysteme, Materialflußmatrix, Investitionsausgaben
Auftragsterminierung	Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme
Auftragsmanagementprüfstand	Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Schichten, Arbeitssysteme, Transportmatrix
Generierung der Kennzahlen	Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme, Produktionsstätte, Investitionsausgaben, Kennzahlen werden berechnet
Bewertung	Kennzahlen, r-Wert wird berechnet
Optimierungsstrategie	Ergebnisse der Bewertung zweier unterschiedlicher Fertigungsabläufe (r-Werte), Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme

Tabelle 3: Module des Produktionsoptimierungssystems mit den jeweils benötigten Daten

Die **Fabriklayoutplanung** stützt sich bei der räumlichen Anordnung auf die Angaben der Produktionsstätte und den Bestand und die Ausdehnung der Arbeitssysteme. Des weiteren sind die Materialflüsse zwischen den einzelnen Arbeitssystemen von Interesse, da zur Reduzierung der Transportzeit Arbeitssysteme mit hohem Materialfluß möglichst nahe zueinander positioniert werden sollen. Schließlich fallen beim Ersetzen bzw. Ergänzen von Arbeitssystemen noch Investitionsausgaben an, welche fortlaufend mitgeführt werden müssen.

Die **Auftragsterminierung** benötigt zur Aufstellung des die Daten der Fertigungsaufträge und Arbeitsschritte (Arbeitspläne sind implizit darin enthalten). Ferner stützt sie sich beim Verschieben von Arbeitsschritten auf die Engpaßangaben der Arbeitssysteme.

Im Rahmen der Simulation des Produktionsablaufs durch den **Auftragsmanagementprüfstand** sind Angaben über Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme zur Durchführung von Arbeitsschritten, Arbeitsschichten sowie die Transportmatrix als Ergebnis der Layoutplanung notwendig.

Kennzahlen werden aus Fertigungsaufträgen, Arbeitsschritten, Arbeitssystemen, der Produktionsstätte oder dem gesamten Fertigungsablauf berechnet. Die Investitionsausgaben werden als fortlaufende Größe mitgeführt.

Die **Bewertung** von Fertigungsabläufen stützt sich auf die in Kapitel 4.6 eingeführten neun Kenngrößen, aus denen der zugehörige r – Wert berechnet wird.

Die **Optimierungsstrategie** hat die Aufgabe, die einzelnen Module anzusteuern. Die Auswahl des Optimierungsschritts stützt sich dabei auf den Vergleich zweier unterschiedlicher Fertigungsabläufe über ihren r-Wert (vgl. Kapitel 4.3, 4.4). Ferner

muß sie über den r-Wert entscheiden, wann der Produktionsoptimierungsprozeß beendet werden soll. Da der momentan beste Fertigungsablauf als Zwischenergebnis festgehalten werden soll, müssen auch Angaben über Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte und Arbeitssysteme (einschließlich ihrer Positionierung) vorliegen.

Zur Datenhaltung sind nun drei verschiedene Ansätze möglich:

(1) jedes Teilmodul hält privat für sich genau die von ihm benötigten Daten;

(2) jedes Teilmodul hält eine vollständige Sammlung aller Daten (vollständige Replikation);

(3) es existiert an einer zentralen Stelle genau eine Instanz für jedes Datum.

Lösung (1) hat den Vorteil, daß jedes Teilmodul unabhängig von seiner Umgebung existieren kann. Der Speicherbedarf gegenüber Lösung (2) ist geringer, da nur die notwendigen Daten gehalten werden. Die Daten können innerhalb jedes Moduls individuell gespeichert sein, der Austausch erfolgt über zu definierende Schnittstellen. Hiermit ist allerdings ein beträchtlicher Synchronisationaufwand verbunden, da bei jedem Aufruf eines Teilmoduls alle Daten übergeben werden müssen, die sich seit dem letzten Aufruf des Teilmoduls geändert haben, um so die Konsistenz des Gesamtsystems zu wahren.

Lösung (2) weist prinzipiell dieselben Vor- und Nachteile wie Lösung (1) auf, allerdings ist der Speicherbedarf höher, und es werden Daten gehalten, die mit der Thematik des Teilmoduls ggf. nichts zu tun haben (z.B. das Fabriklayout im Auftragsterminierungsmodul).

Lösung (3) hat den Vorteil, daß hier der geringste Speicherbedarf anfällt, da jede Information nur einmal existiert. Nachteilig ist der hohe Kopplungsgrad, da alle Teilsysteme das gleiche interne Datenmodell verwenden müssen. Dies ist besonders problematisch, da das Fabriklayoutplanungssystem bereits ein fertig entwickeltes Datenmodell aufweist (Ablage der Daten in einer relationalen Datenbank), das sich jedoch nicht als zentraler Ablageort eignet, da es im Sinne des Produktionsoptimierungssystems unvollständig ist.

Für das Produktionsoptimierungssystem wird dennoch die **zentrale Lösung** favorisiert: So ist aufgrund der großen Menge an verarbeiteten Daten der Aufwand zur fortlaufenden Synchronisation immens. Man kann sich leicht vorstellen, daß bei komplexen Fertigungsabläufen und Planungsperioden von mehreren Monaten die Anzahl der Fertigungsaufträge und Arbeitsschritte sehr groß wird. Der Produktionsoptimierungsprozeß weist einen stark verzahnten Ablauf auf (vgl. Abbildung 61), bei dem die Zahl der Modulaufrufe und damit Synchronisationspunkte pro Durchlauf des Prozesses so groß wird, daß die fortlaufende Synchronisation nicht als praktikable Lösung angesehen werden kann. Ferner bietet es sich an, das Produktionsoptimierungssystem an ein etwa vorhandenes ERP-System anzubinden (vgl. Abschnitt 5.3), in welchem die relevanten Daten des Unternehmens sowieso zentral (innerhalb des ERP-Systems) gespeichert sind. Falls die einzelnen Teilsysteme die Möglichkeit haben, direkt auf die zentral gespeicherten Informationen zuzugreifen, entfällt zusätzlich der Aufwand zum Datentransport zwischen den Teilsystemen.

Die Menge aller Daten, die **einen** Ablauf der Fertigung auf einer bestimmten Menge von Arbeitssystemen (inklusive ihrer Positionierung) einschließlich der Beschreibung durch Kenngrößen charakterisiert, wird deshalb zusammengefaßt und als **Szenario** (vgl. auch Kapitel 4.1) bezeichnet.

```
Szenario
-------------------------------------------
produktionsstaette  : Produktionsstaette
fertigungsAuftraege : array of
                      Fertigungsauftrag
arbeitsSchritte     : array of
                      Arbeitsschritt
arbeitsSysteme      : array of
                      Arbeitssystem
produkte            : array of Produkt
arbeitsschicht      : Schicht
transportMatrix     : Transportmatrix
materialflussMatrix : Materialflussmatrix
kenngroessen        : array [1..9] of
                      real
r-Wert              : real
-------------------------------------------
get_produktionsst   : Produktionsstaette
set_produktionsst   : void
get_fertigungsauftr : array of
                      Fertigungsauftrag
set_fertigungsauftr : void
...
create_Szenario     : Szenario
destroy_Szenario    : void
```

Abb. 62: Die Klasse `Szenario`

Die Attribute der Klasse `Szenario` werden über Selektoren der Form `get_<attribut>` und Modifikatoren `set_<attribut>` gekapselt. Zur Erzeugung und zum Löschen eines Szenario-Objekts stehen ein Konstruktor `create_Szenario` sowie ein Destruktor `destroy_Szenario` zur Verfügung.

Auf diese Weise wird jedes Szenario als Objekt an das betreffende Teilmodul übergeben. So kann auch die Handhabung mehrerer verschiedener Szenarien, wie sie bei Zwischenspeicherung des gegenwärtig besten Produktionsablaufs notwendig war, ohne großen Aufwand geschehen.

5.3 Datenaustausch zwischen den Teilsystemen

Gemäß der Grundphilosophie des Produktionsoptimierungssystems (vgl. Abschnitt 5.1) ist es ein zentrales Anliegen, die einzelnen Teilsysteme voneinander so unabhängig zu machen, daß das Ersetzen prinzipiell jedes Teilsystems durch ein anderes mit gleicher Funktionalität möglich ist. Dabei sollen die Vorteile der zentralen Ablage aller Daten (einmalige Speicherung, Wegfall des Datentransfers zwischen den Teilsystemen) möglichst gewahrt bleiben. Idealerweise greifen die Teilsysteme also direkt auf die zentral abgelegten Daten zu und legen ihre Resultate dort, sichtbar für die anderen Teilsysteme, ab (vgl. Abbildung 63).

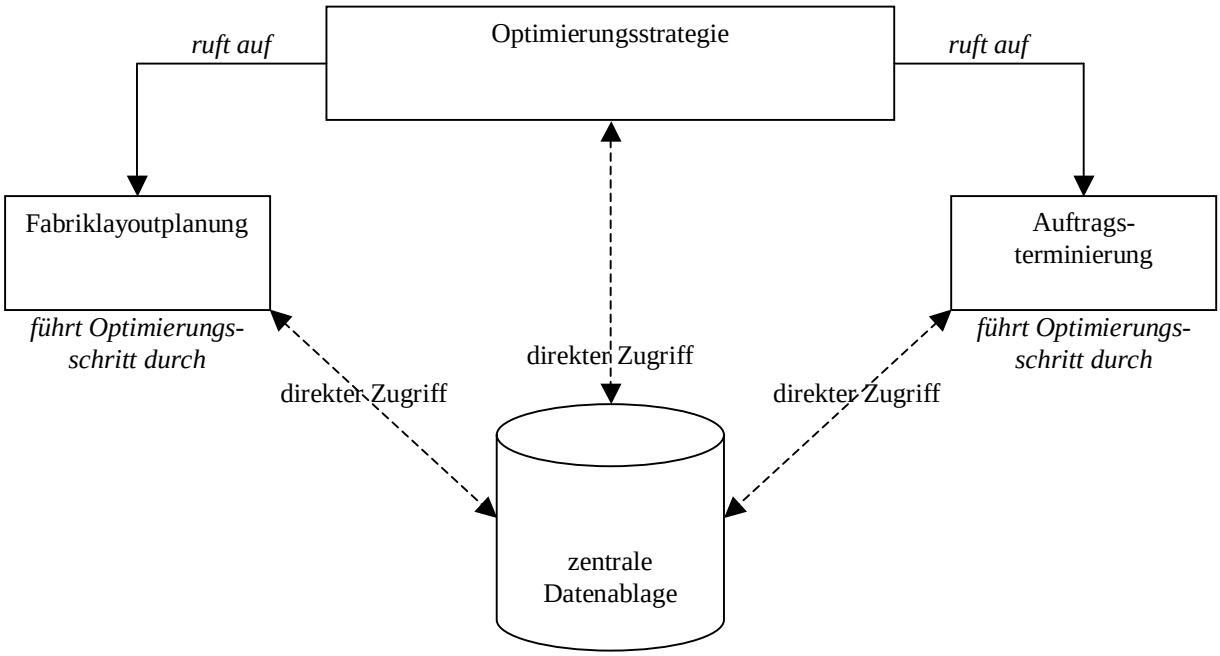

Abb. 63: Direkter Zugriff der Teilsysteme am Beispiel von Optimierungsstrategie, Fabriklayoutplanung und Auftragsterminierung

Ein Datenaustausch ist dort notwendig, wo die Teilsysteme **nicht** direkt auf die zentral gespeicherten Daten zugreifen, sei es weil sie ihre Ein- und Ausgabegabedaten in anderer Form erwarten (Auftragsmanagementprüfstand, vgl. Kapitel 2.3) oder weil sie ihr **eigenes Datenmodell**, verbunden mit **separater Speicherung** ihrer Daten, verwenden (Fabriklayoutplanungssystem, vgl. Kapitel 2.2). Der Abgleich aller Daten kann in beiden Fällen durch Verwendung einer **Integrationskomponente** durchgeführt werden. Die Integrationskomponente ist dabei ein Anwendungsprogramm, mit dessen Hilfe die Daten aus der zentralen Datenablage gelesen bzw. in die zentrale Datenablage geschrieben werden können[162]. Im Fall des Produktionsoptimierungssystems wird vor jedes Teilsystem, das nicht direkt auf die zentrale Datenablage zugreifen kann, eine solche Integrationskomponente gesetzt. Die Ansteuerung des Teilsystems erfolgt dann nicht direkt, sondern durch Aufruf seiner Integrationskomponente (vgl. Abbildung 64).

[162] Vgl. Heinkel (2000), S. 66

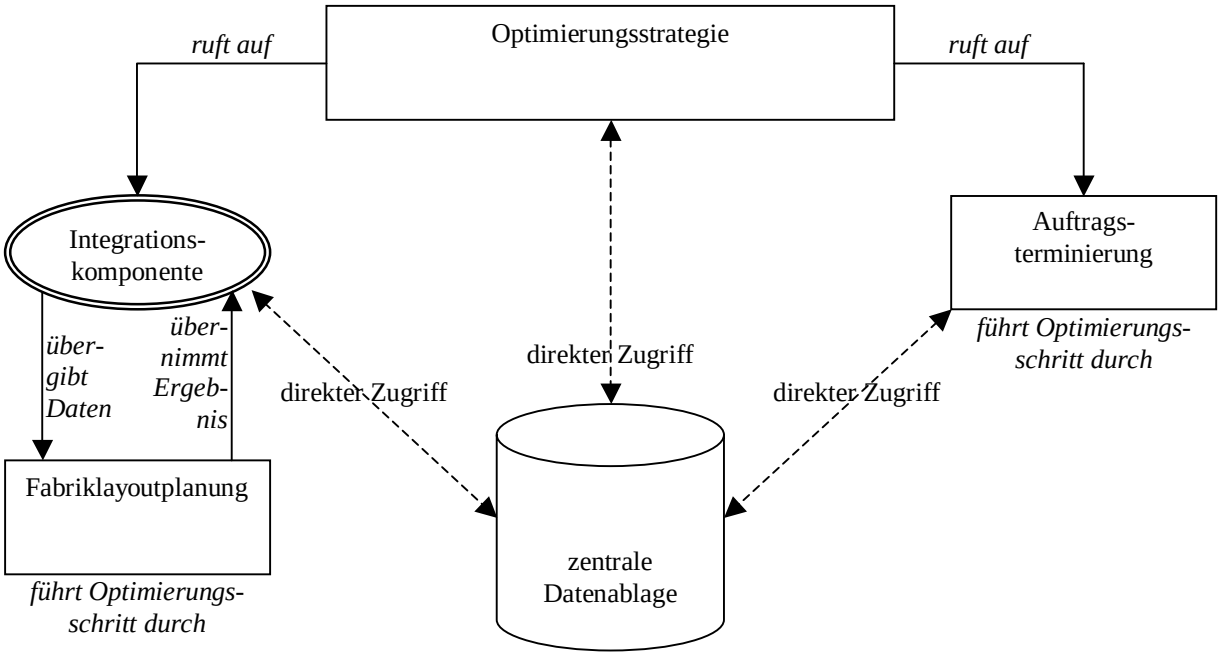

Abb. 64: Indirekter Zugriff des Teilsystems Fabriklayoutplanung unter Verwendung einer Integrationskomponente

a) Integrationskomponente für den Auftragsmanagementprüfstand aus Kapitel 2.3

Der Auftragsmanagementprüfstand erwartet in der gegenwärtigen Fassung[163] seine Eingabedaten in Form mehrerer Textfiles, in welchem die Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme und Schichten textuell beschrieben sind. Das Ergebnis des Auftragsmanagementprüfstands ist ebenfalls ein Textfile („*tracefile*“), in welchem die Ergebnisse der Simulation festgehalten sind. Aufgabe der Integrationskomponente ist es, solche Textfiles aus dem Szenario-Objekt zu generieren und an einer geeigneten Stelle abzulegen, von wo aus der Auftragsmanagementprüfstand sie lesen kann. Des weiteren muß die Integrationskomponente nach Beendigung des Simulationslaufs die Ist-Daten der Arbeitsschritte aus dem erzeugten „*tracefile*“ in die zentrale Datenablage schreiben.

Integrationskomponente und Auftragsmanagementprüfstand müssen folglich entweder einen gemeinsam erreichbaren Festspeicherplatz teilen oder über Nachrichten kommunizieren und die Textfiles gegenseitig aneinander verschicken. Des weiteren muß die Integrationskomponente die Möglichkeit haben, den Start des Auftragsmanagementprüfstands zu veranlassen und bei Beendigung eine Nachricht darüber aufzunehmen. Momentan ist keine solche Funktionalität beim Auftragsmanagementprüfstand implementiert, so daß an dieser Stelle Erweiterungsbedarf vorhanden ist.

b) Integrationskomponente für die Fabriklayoutplanung aus Kapitel 2.2

Die Integrationskomponente hat hier prinzipiell dieselben Aufgaben zu erfüllen wie beim Auftragsmanagementprüfstand (Datenkonvertierung, Aufruf, Rücknahme der Ergebnisse). Zusätzlich ist jedoch zu beachten, daß das Fabriklayoutplanungssystem

[163] Stand August 2001

seine Daten separat in einer relationalen Datenbank speichert. Die Integrationskomponente muß also zusätzlich für die Synchronisation zwischen der relationalen Datenbank des Fabriklayoutplanungssystems und der zentralen Datenablage des Produktionsoptimierungssystems sorgen. Dies kann problematisch sein, falls während eines Produktionsoptimierungsprozesses eine Änderung der Daten in der relationalen Datenbank des Fabriklayoutplanungssystems geschieht. Hier ist also, zusätzlich zur Entwicklung von geeigneten Kommunikations-schnittstellen beim Fabriklayoutplanungssystem, ein entsprechendes Ausschluß-verfahren zu konzipieren.

5.4 Integration unter Verwendung eines ERP-Systems am Beispiel von SAP R/3

Die folgenden Ausführungen sollten sich sinngemäß auch auf den Einsatz jedes beliebigen ERP-Systems übertragen lassen. Die Auswahl von SAP R/3 als Beispielsystem erfolgte, da SAP R/3 Marktführerstellung im Bereich der ERP-Systeme besitzt und es sicherlich den bekanntesten Vertreter darstellt.

SAP R/3 basiert auf folgendem **Schichtmodell**:

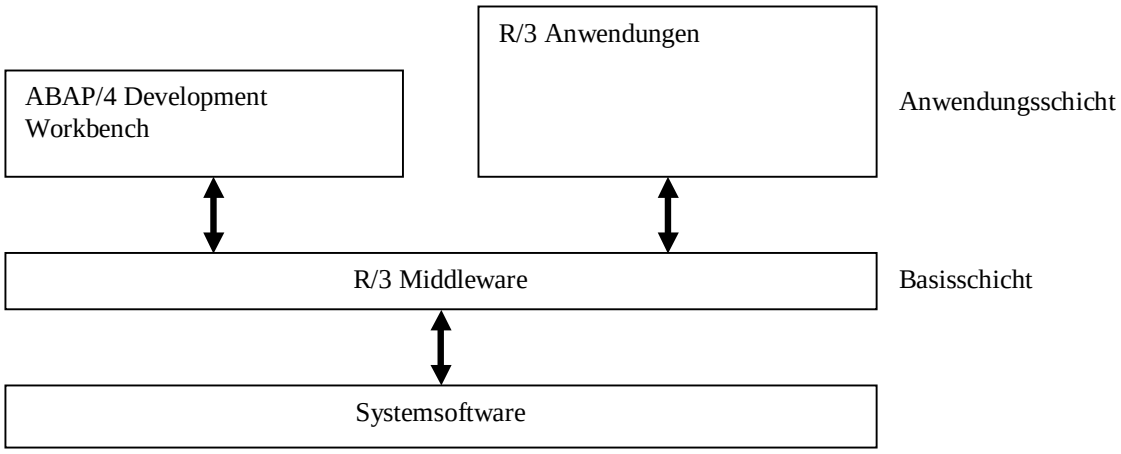

Abb. 65: Schichtmodell von SAP R/3 (Quelle: Buck-Emden/Galimow (1996), S. 113)

Die **Anwendungsschicht** enthält alle betriebswirtschaftlichen Anwendungen, welche in der Programmiersprache ABAP/4 entwickelt werden. Es sind folgende Anwendungen in SAP R/3 realisiert: Finanzwesen, Controlling, Anlagenwirtschaft, Vertrieb, Materialwirtschaft, Produktionsplanung, Qualitätsmanagement, Instandhaltung, Projektmanagement sowie Personalwirtschaft. Zusätzlich enthält diese Schicht Werkzeuge zur Entwicklung / Anpassung vorhandener SAP R/3 Anwendungen. Aufgabe der **Basisschicht** (Middleware) ist es, die Unabhängigkeit der SAP-R/3 Anwendungen von den Schnittstellen der in der untersten Schicht liegenden Systeme zu gewährleisten. In der untersten Schicht (**Systemsoftware**) befinden sich Betriebs-, Kommunikations- sowie Datenbankmanagementsysteme[164].

Die Datenhaltung erfolgt in SAP R/3 über sog. Businessobjekte (**Business Objects**, BO). Diese repräsentieren Objekte der realen Welt, die für das Unternehmen

[164] Vgl. Buck-Emden/Galimow (1996), S. 113ff.

relevant sind (z.B. Fertigungsauftrag, Kunde). Ihre Verwaltung erfolgt über das **Business Object Repository**, in welchem die Objekte einschließlich ihrer Methoden hierarchisch abgelegt sind.

Businessobjekte werden ihrerseits wieder durch Verwendung eines Schichtmodells vor fälschlicher Verwendung geschützt. Das hierzu verwendete Schichtmodell umfaßt

- die Kernschicht mit den Daten der Businessobjekte;
- die Integritätsschicht mit Integritätsbedingungen (constraints);
- die Schnittstellenschicht, in welcher die externe Sicht festgelegt wird sowie
- die Zugriffsschicht, welche den Zugriff auf die Businessobjekte über verschiedene Technologien (z.B. Java) festlegt[165].

Der **Zugriff** auf Businessobjekte erfolgt über das **Business Application Programming Interface** (BAPI), welches die erforderlichen Schnittstellen des Zugriffs bereitstellt. Der Zugriff kann entweder objektorientiert oder über einen RFC-Zugriff (Remote Function Call – Aufruf eines externen Funktion oder Start eines ABAP/4-Programms von einem externen System[166]) erfolgen[167] (vgl. Abbildung 66).

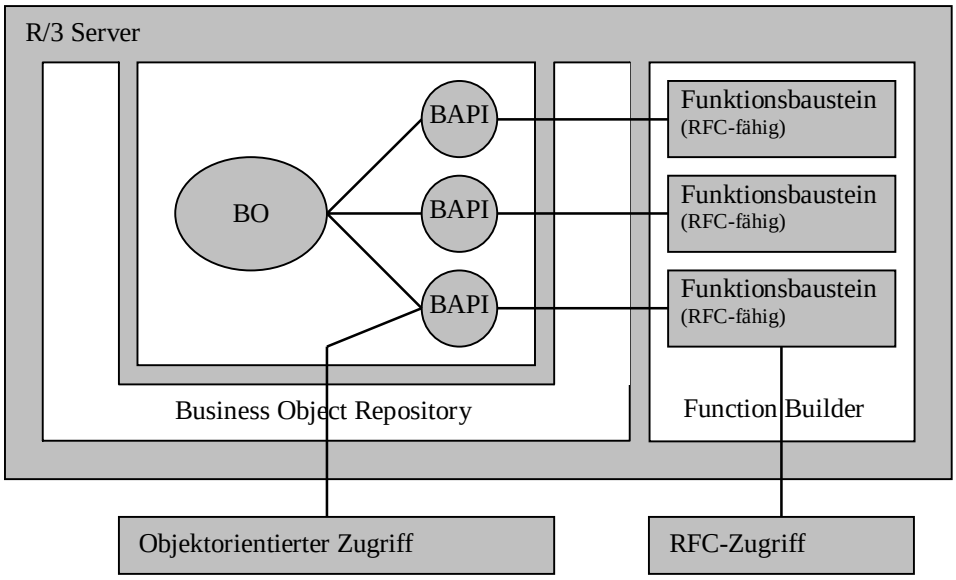

Abb. 66: Zugriffsstrategie für BAPIs (Quelle: SAP (1997), S. 14)

Zur Realisierung des Produktionsoptimierungssystems unter SAP R/3 ist zunächst die Ablageform der Szenariodaten zu klären. Es bietet sich intuitiv an, Szenario-Objekte in Form von Businessobjekten abzulegen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Geschäftsdaten des Unternehmens hinsichtlich Fertigungsaufträgen, Arbeitsschritten, Arbeitssystemen etc. im Regelfall bereits in Form gesonderter Businessobjekte vorliegen, welche jedoch vom Produktionsoptimierungssystem in ihren Inhalten **nicht** verändert werden dürfen, da die Ergebnisse des Produktions-

[165] Vgl. SAP (1997), S. 9
[166] Vgl. Buck-Emden/Galimow (1996), S. 167f.
[167] Vgl. SAP (1997), S. 12ff.

optimierungssystems als Vorschläge bzw. Plandaten anzusehen sind. Aus diesem Grund sollen die Szenario-Objekte für den Produktionsoptimierungsprozeß aus den vorhandenen Businessobjekten, welche Fertigungsaufträge, Arbeitsschritte, Arbeitssysteme etc. beschreiben, durch Analyse des im ERP-System verwendeten Datenmodells über eine Abbildungsfunktion abgeleitet und separat im Business Objekt Repository gespeichert werden.

Die Implementierung der Teilmodule erfolgt entweder direkt in ABAP/4 oder unter Verwendung jeder anderen Technologie, welche sich zur Anbindung an SAP R/3 eignet. Der Aufruf der Teilmodule erfolgt dann, soweit möglich, über RFC-Zugriff oder über Einbeziehung von Integrationskomponenten (vgl. Abschnitt 5.3).

5.5 Ansätze zur Flexibilität des Produktionsoptimierungs-systems selbst

In diesem Abschnitt soll kurz auf die Flexibilität des Produktionsoptimierungssystems selbst eingegangen werden.

Grundlegendes Konzept hierzu ist, wie bereits zu Anfang des Kapitels 5 dargestellt, der Aufbau des Produktionsoptimierungssystems aus austauschbaren Modulen. Dies soll sich speziell auch auf die Optimierungsstrategie als Teilmodul beziehen. Auf diese Weise soll sich jede Funktionalität des Produktionsoptimierers entsprechend anderer und/oder zukünftiger Aufgaben anpassen lassen. Der **Grundaufbau** des Produktionsoptimierungssystems soll vor diesem Hintergrund folgendem Schema folgen (vgl. Abbildung 67).

Es gibt ein **Initialisierungsmodul**. Seine Aufgabe ist es, alle anderen beteiligten Module zu registrieren und anschließend deren individuelle Initialisierungsfunktion aufzurufen. Dies war z.B. beim Auftragsterminierungsmodul notwendig, um vor Eintritt in den Optimierungsprozeß den Netzplan aufzustellen. Eine weitere denkbare Anwendungen ist, daß im Bewertungsmodul die Gewichtung der einzelnen Kennzahlen festgelegt wird und im Optimierungsstrategiemodul die Höchstschranke der Einzeloptimierungsschritte angegeben wird, nach der der Optimierungsprozeß in jedem Fall beendet werden soll. Im Anschluß an die Initialisierung erfolgt der Aufruf des Optimierungsstrategiemoduls.

Der eigentliche Produktionsoptimierungsprozeß besteht aus dem Zusammenspiel von **Optimierungsstrategiemodul** und den anderen angebundenen **Teilsystemen**. Das Optimierungsstrategiemodul sorgt dabei für die Ansteuerung der Teilsysteme, in denen entweder Optimierungsschritte oder sonstige Aufgaben (Generierung von Kennzahlen, Bewertung) ausgeführt werden. Je nach dem, ob ein Teilsystem direkt mit der zentralen Datenablage kommunizieren kann oder nicht, sind **Integrationskomponenten** vorgeschaltet.

Nach Beendigung der Optimierungsphase wird das Ergebnis an den Aufrufenden zurückgegeben. Prinzipiell kann es sich dabei auch um eine bloße Nachricht über das Vorliegen des Optimierungsergebnisses handeln, da das Optimierungsergebnis aus der zentralen Datenablage abgefragt werden kann.

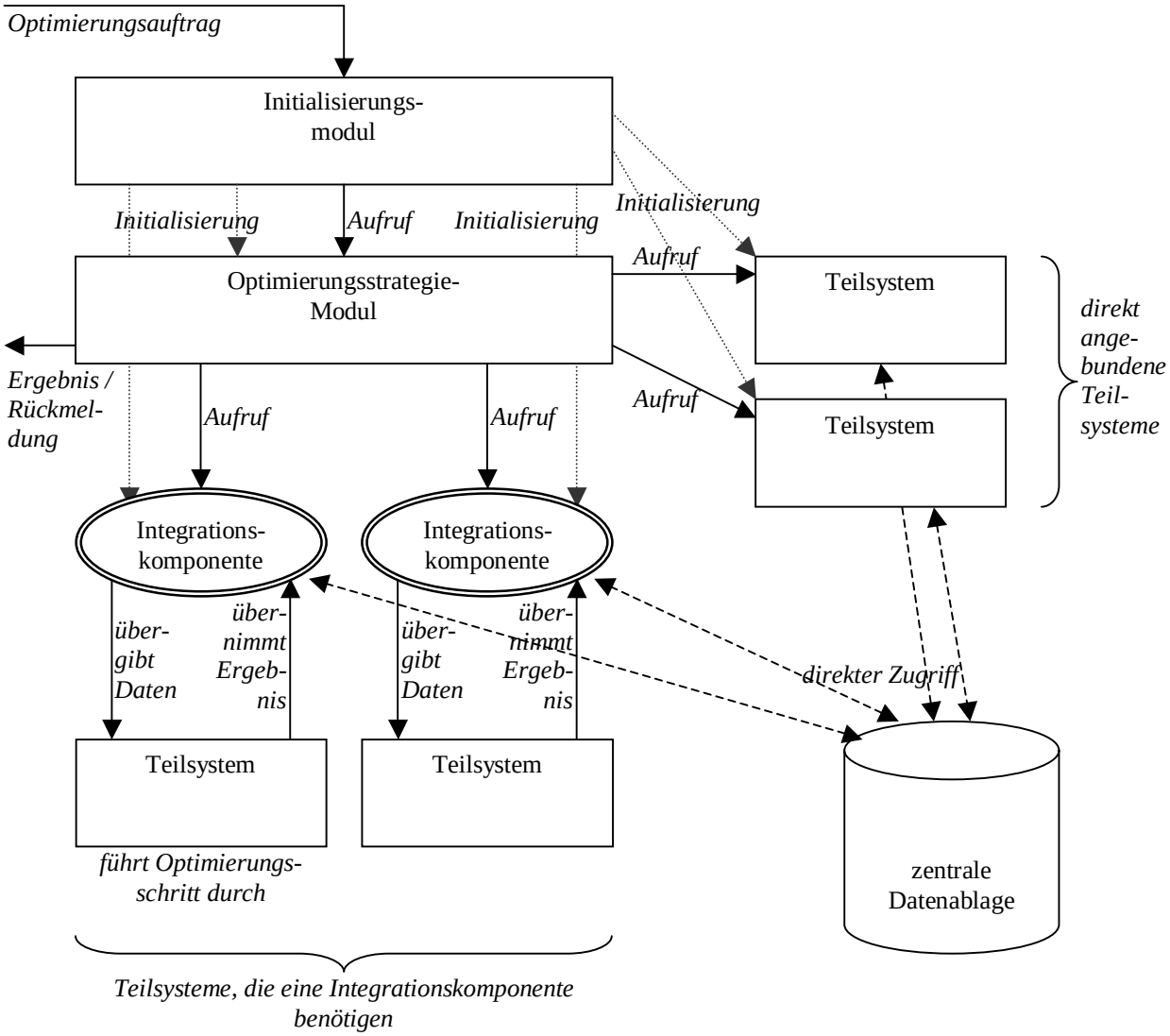

Abb. 67: Schematischer Aufbau des Produktionsoptimierungssystems

Folgende Parameter sind vor Beginn der Optimierung vom Benutzer einzustellen:

- Festlegung der **Höchstgrenze** der Optimierungsschritte (Fabriklayoutplanung bzw. Auftragsterminierung), nach welcher der Optimierungsprozeß auf jeden Fall beendet werden soll;
- Festlegung, ob im Rahmen der Auftragsterminierung das **Voranziehen** von Arbeitsschritten geschehen soll oder nicht;
- **Gewichtung** der neun Kenngrößen im Rahmen der Bewertung (Berechnung des r-Werts) und **Festsetzung des p-Werts**;
- Einstellung der **Anzahl der Mindestdurchläufe** des Auftragsterminierungs-moduls, bevor die Prüfung hinsichtlich seines weiteren Optimierungspotentials erfolgt.

6. Anwendung

6.1 Überblick

In diesem Kapitel sollen Anwendungsmöglichkeiten für das Produktionsoptimierungssystem innerhalb betrieblicher Entscheidungsprozesse diskutiert werden. Der Grundablauf des Produktionsoptimierungsprozesses ist dabei immer derselbe, es steht vielmehr das **Zusammenspiel mit der betrieblichen Umwelt** im Vordergrund der Betrachtungsweise.

In den folgenden Abschnitten werden die Anwendungsbereiche

- Produktionsplanung,
- Reengineering,
- Auftragsannahme und
- Investitionsbeurteilung

betrachtet und hinsichtlich Einsatzmöglichkeiten bewertet.

6.2 Produktionsplanung

Wie bereits ausgeführt, geht es bei der Produktionsplanung um Probleme der Art, daß die gewinnmaximale Produktion für eine oder mehrere Planungsperioden bestimmt werden soll[168]. Dies kann sich aus Anwendungssicht entweder auf die **Gestaltung einer neuen Produktionsstätte** (im Sinne eines Neuaufbaus) oder auf die **fortlaufende Anpassung** der Produktion im Zuge der Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit beziehen.

6.2.1 Neugestaltung einer Produktionsstätte

Die **Neugestaltung** einer Produktionsstätte stellt einen einmaligen Prozeß dar. Sie soll im folgenden die Phasen von der Planung ihrer Ausgestaltung bis zu ihrer Realisierung (Bau der Produktionsstätte, Aufstellen der Arbeitssysteme) umfassen. Es soll also bereits die Entscheidung über das Errichten der Produktionsstätte im positivem Sinn gefällt sein. Ferner seien Plandaten über die in der neuen Produktionsstätte auszuführenden Tätigkeiten (Fertigungsaufträge, Arbeitspläne, Arbeitssysteme) vorhanden.

Basierend auf den Plandaten wird der Produktionsoptimierungsprozeß angestoßen. Hierdurch lassen sich speziell Schwachstellen des Produktionsablaufs (Engpässe, Qualität der Fertigung allgemein) über die Kenngrößen Durchlaufzeit, Termintreue etc. erkennen. Der Schwerpunkt bei der Anwendung des Produktionsoptimierungssystems liegt hierbei auf dem **Simulationsaspekt** und weniger auf dem Optimierungsteil. Die Höchstgrenze für die Anzahl der durchzuführenden Optimierungsschritte (vgl. Kapitel 5.5) ist entsprechend auf einen relativ niedrigen Wert einzustellen. Vielmehr steht die Generierung möglicher Szenarien anhand der

[168] Vgl. Fandel (1991), S. 16

Plandaten, ihre Analyse bezüglich vorhandener Schwachstellen, die manuelle Suche nach Verbessrungsmöglichkeiten sowie die anschließende vergleichende Bewertung der so geschaffenen Alternativen im Vordergrund. Abbildung 68 zeigt den Prozeß der Neugestaltung einer Produktionsstätte unter Einbindung des Produktions-optimierungssystems.

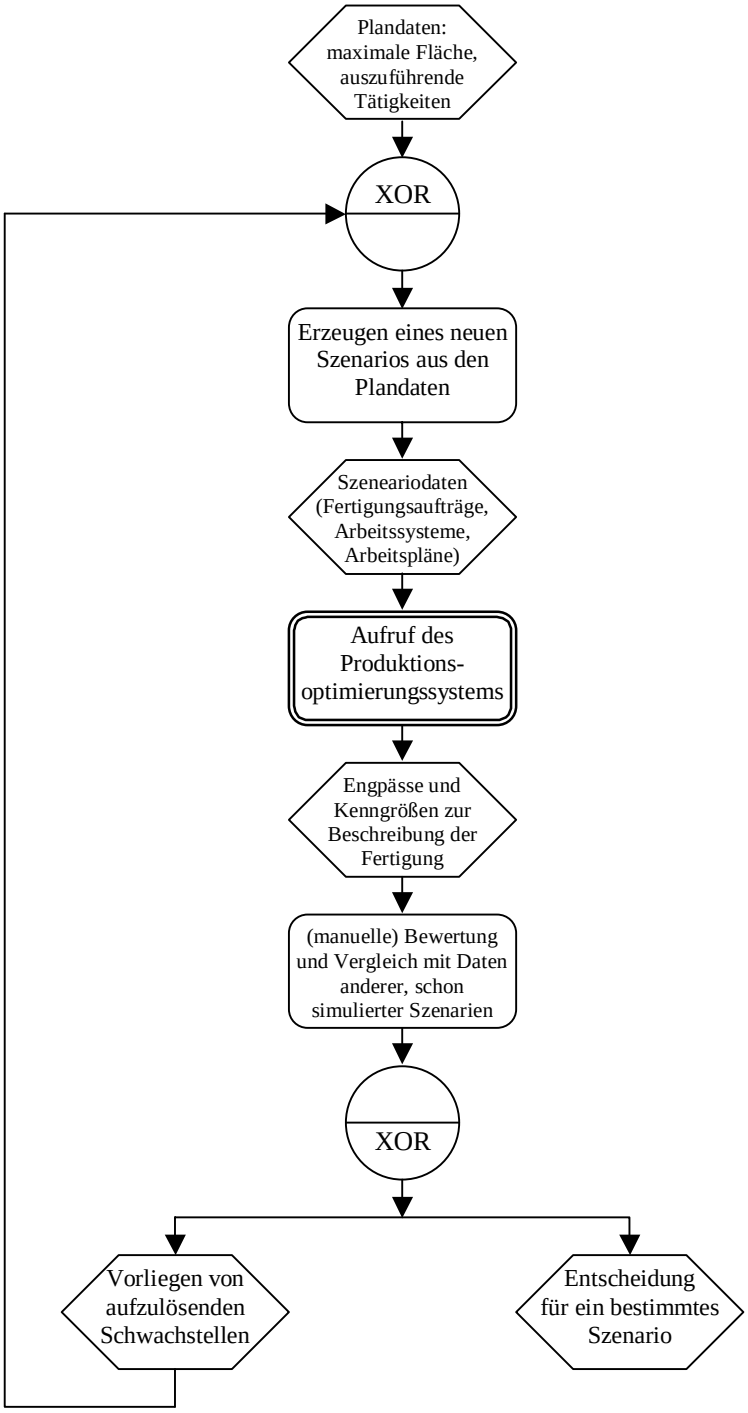

Abb. 68: Neugestaltung einer Produktionsstätte unter Einbindung des Produktions-optimierungssystems

Nach der Entscheidung für ein bestimmtes Szenario werden die zugrunde liegenden Daten hinsichtlich verwendete Arbeitssysteme, Layout (und daraus abgeleitet Flächenbedarf) zur weiteren Planung und schließlich Realisierung verwendet.

6.2.2 Fortlaufende Produktionsplanung

Die Einbeziehung des Produktionsoptimierungssystems in den Produktionsplanungsprozeß erfolgt zum einen zu **Beginn jedes Planungszeitraums** (z.B. quartalsweise). Es liegen dann die Plandaten für den betrachteten Planungszeitraum bezüglich vorhandener Arbeitssysteme, eingeplanten Fertigungsaufträgen, Arbeitsschichten, gewünschten Kenngrößen etc. vor. Aufgabe des Produktionsoptimierungssystems ist es nun, einen möglichst optimalen Ablauf der Fertigung für den Planungszeitraum zu erstellen und vorzuschlagen. Der Schwerpunkt bei der Anwendung liegt hier also auf dem **Optimierungsaspekt**.

Die Anwendung erfolgt durch Aufruf des Produktionsoptimierungssystems unter Zusammenfassung der Plandaten für den Produktionsablauf, wie er sich aus der jeweiligen PPS-Methode ergeben hat. Durch **Vorschlagen** von Anpassungen (Umpositionierung von Arbeitssystemen, Verschieben von Arbeitsschritten etc.) wird vom Produktionsoptimierungssystem versucht, den gegebenen Fertigungsablauf gemäß der vorgegebenen Optimierungskriterien zu verbessern. Ferner ist auch an dieser Stelle ein Quervergleich zwischen mehreren möglichen Fertigungsabläufen, wie sie sich nach Ausschöpfen ihrer Optimierungspotentiale ergeben, möglich.

Zum anderen ist die **fortlaufende** Überprüfung und Optimierung des Fertigungsablaufs in regelmäßigen Abständen und bei Eintreten eines besonderen Ereignisses wünschenswert. Dies ist dadurch zu begründen, daß der „*drift*“, d.h. die Abweichung zwischen den im Produktionsoptimierungssystem verwendeten Modelldaten und den Ist-Daten der Fertigung, wie sie sich im fortlaufenden Betrieb ergeben, möglichst gering gehalten werden soll. So müssen Verzögerungen aufgrund von Maschinenausfällen, Streik, Krankheit von Personal und anderer Umstände eine Abbildung in das Modell erfahren, so daß über eine möglichst exakte Wiedergabe der tatsächlich vorherrschenden Produktionsbedingungen baldmöglichst eine Lösung für die aufgetretenen Probleme erarbeitet werden kann. Die Nützlichkeit des Produktionsoptimierungssystems ist nur dann gewährleistet, wenn abgebildete Realität und Modelldaten eine möglichst große Übereinstimmung aufweisen.

Abbildung 69 zeigt die Anwendung des Produktionsoptimierungssystems im Zuge der fortlaufenden Produktionsplanung.

6.3 Business Process Reengineering

Business Process Reengineering bezeichnet Methoden, durch Einsatz welcher ein Unternehmen eine deutliche Leistungsverbesserung in Bezug auf Kosten, Service oder Qualität erzielen kann, wobei **Geschäftsprozesse** (*business processes*) im Vordergrund der Betrachtungsweise stehen.[169] **Geschäftprozesse** sind dabei eine bereichsübergreifende Folge einzelner Aktivitäten[170].

[169] Vgl. Johansson/McHugh/Pendlebury/Wheeler (1993), S. 15f.
[170] Vgl. Johansson/McHugh/Pendlebury/Wheeler (1993), S. 16

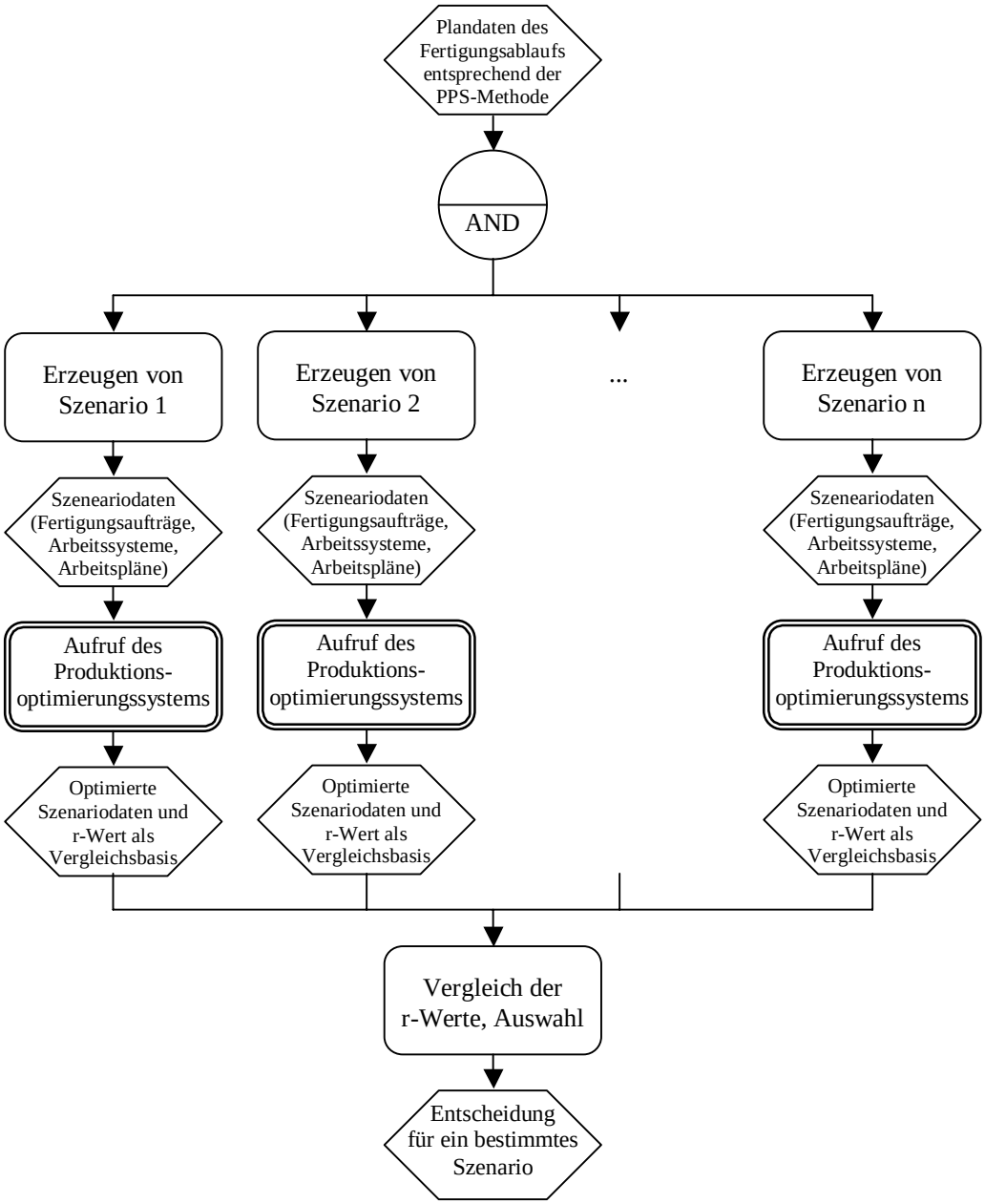

Abb. 69: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems in den Produktionsplanungsprozeß

Die Anwendungsmöglichkeit innerhalb des Business Process Reengineering ist mit der Neugestaltung von Produktionsstätten verwandt. Auch hier liegt der Schwerpunkt des Einsatzes auf der **Simulation** und Generierung von aussagekräftigen Kennzahlen.

Business Process Reengineering ist, da eine Vielzahl von Bereichen zu betrachten ist, ein komplexer Vorgang, an dem eine große Zahl von Spezialisten beteiligt ist[171]. Das Produktionsoptimierungssystem kann hier als Werkzeug dienen, mit dem auf Basis der erarbeiteten Restrukturierungsmaßnahmen die Feinplanung der Fertigungsabläufe erfolgen kann. Ferner ist durch Vergleich von Optimierungspotentialen von verschiedenen Restrukturierungsvorschlägen anhand

[171] Vgl. Johansson/McHugh/Pendlebury/Wheeler (1993), S. 16

der vom Produktionsoptimierungssystem generierten Kennzahlen eine Auswahlhilfe bei der Gestaltung des eigentlichen Business Process Reengineering denkbar.

6.4 Auftragsannahme

Die Auftragsannahme betrifft die Fragestellung, ob bei Eintreffen einer Kundenbestellung die Annahme des Auftrags unter Beachtung der gegenwärtigen Kapazitäten erfolgen kann oder nicht[172]. Hierbei ist speziell der **Wert** von Aufträgen für das Unternehmen zu beachten. Je nach Strategie und Unternehmenskultur kann es die Philosophie des Unternehmens sein, einmal angenommene Aufträge nach bestmöglichem Bestreben zum vereinbarten Lieferungstermin fertigzustellen, oder aber, den gegenwärtigen Auftragsbestand, auch nach Hinzukommen eines neuen Auftrags, so zu gewichten und abzuarbeiten, daß in der Planungsperiode höchstmögliche Deckungsbeiträge realisiert werden. Der erste Ansatz wird eher bei Unternehmen zu finden sein, welche auf Einzel- und Serienfertigung[173] spezialisiert sind, da hier eine intensive Bindung zum Kunden notwendig ist. Demgegenüber ist bei der anonymen Massenfertigung die Realisierung niedriger Stückkosten durch hohe Ausbringungsmengen vorrangiges Ziel[174], wie es sich durch die Verfolgung der zweiten Strategie erreichen läßt.

Der Einsatz des Produktionsoptimierungssystems bei der Auftragsannahme kann prinzipiell im Rahmen jeder möglichen Strategie erfolgen. Durch Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien (Ablehnung des Auftrags, Annahme des Auftrags) können die Auswirkungen auf den Fertigungsablauf als ganzes verglichen werden. So erlaubt es das Produktionsoptimierungssystem beispielsweise, Aussagen darüber zu treffen, inwiefern die Liefertermine der übrigen Fertigungsaufträge gefährdet sind, falls der neue Auftrag zum Zeitpunkt X in den Fertigungsablauf miteinbezogen wird. Dabei beschränkt sich das Produktionsoptimierungssystem nicht auf die bloße Simulation, sondern sucht im Rahmen der Optimierungsphase zusätzlich nach dem hinsichtlich vorgegebener Kriterien besten Ablauf für das gegebene Szenario. Des weiteren erlaubt es das Produktionsoptimierungssystem, auch den möglichen Lieferzeitpunkt für den neuen Fertigungsauftrag, sobald er an einer geeigneten Stelle eingeplant wurde, planmäßig vorauszusagen.

Die Anwendung des Produktionsoptimierungssystems bei der Auftragsannahme vollzieht sich dann in folgendem Prozeß (vgl. Abbildung 70):

Im ersten Schritt erfolgt die manuelle Generierung möglicher Szenarien, wie sie sich ergeben, wenn der neue Fertigungsauftrag angenommen werden würde. Hierbei müssen freie Kapazitäten vorliegen oder geschaffen werden. Das Wissen darüber ist bei einem Spezialisten vorhanden, der für den Produktionsprozeß im Unternehmen verantwortlich ist. Von diesem Spezialisten erfolgt gemäß seiner Überlegungen die Erstellung der möglichen Szenarien. Der Aufruf des Produktionsoptimierungssystems erfolgt für jedes erzeugte Szenario. Basierend auf der Analyse der Auswirkungen, welche aufgrund der Einplanung des neuen Auftrags in den Fertigungsablauf für die anderen Fertigungsaufträge entstehen, erfolgt die

[172] Vgl. Mercer (1992), S. 457ff.
[173] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 131f.
[174] Vgl. Zahn/Schmid (1996), S. 132

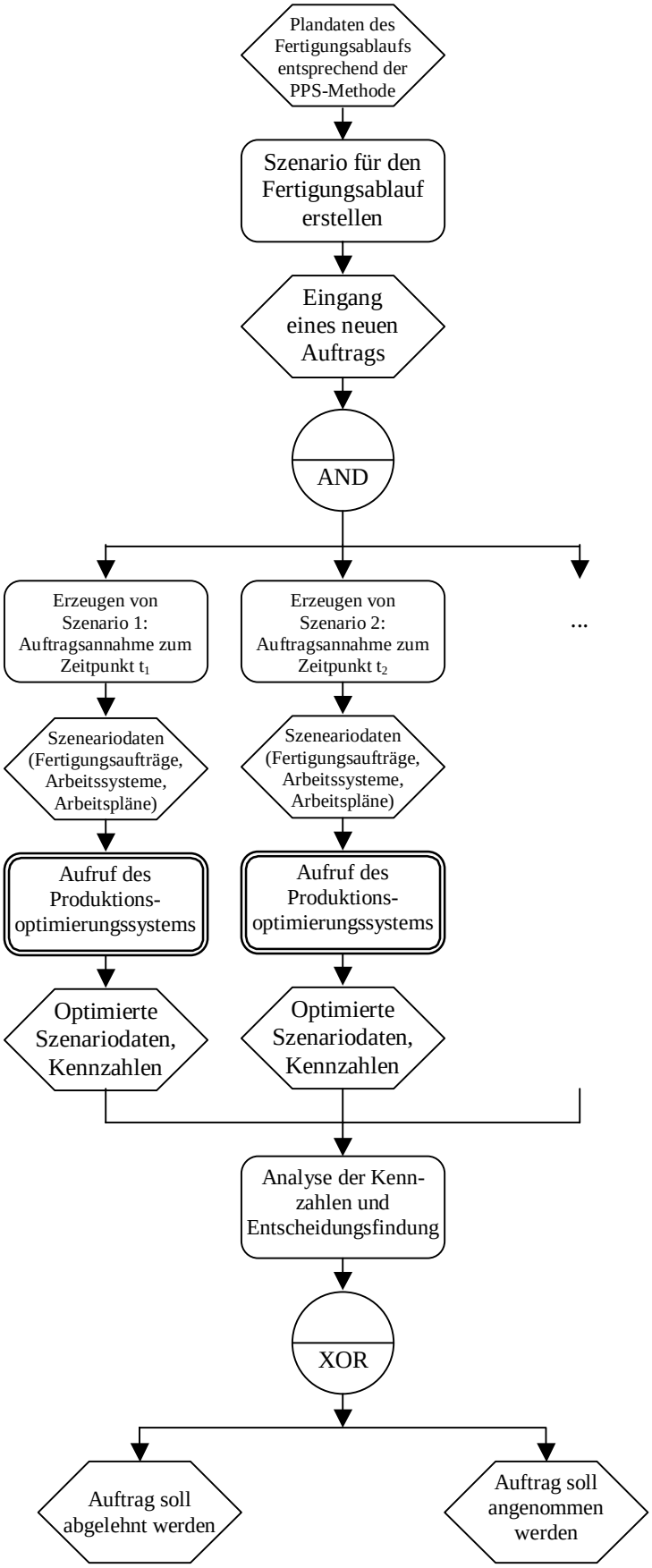

Abb. 70: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems in die Auftragsannahme

Entscheidungsfindung darüber, ob der neue Auftrag angenommen wird, und falls ja, wo er einzuplanen ist. Der mögliche Lieferungstermin kann dann aus den Daten des Szenarios bestimmt werden, für welches eine positive Entscheidung getroffen wurde.

6.5 Investitionsbeurteilung

Bei der Investitionsbeurteilung im Rahmen dieses Abschnitts soll die Fragestellung betrachtet werden, ob der Fertigungsablauf durch Erweiterung des Bestands der Arbeitsmittel derart verbessert werden kann, daß die mit dem Kauf verbundenen Ausgaben zumindest so gedeckt werden, daß sie als lohnenswert angesehen werden können. Das Produktionsoptimierungssystem fungiert wiederum als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung, indem über den Vergleich alternativer Szenarien die Auswirkungen der jeweiligen Entscheidung aufgezeigt werden.

Bei der Anwendung als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung bei Investitionen sind grundsätzlich zwei Szenarien zu generieren: Einmal eines für den Produktionsablauf unter Verwendung des gegenwärtig vorhandenen Bestands an Arbeitssystemen, zum anderen ein Szenario, das das betreffende, neu zu beschaffende Arbeitssystem enthält. Durch Optimierung beider Szenarien werden so die Potentiale der Fertigung in beiden Fällen aufgezeigt. Man beachte hierbei speziell, daß die Kapazitätsauslastung ggf. mit umgekehrten Vorzeichen bewertet werden sollte (d.h. eine allgemein sinkende Kakazitätsauslastung bei Einführung des zusätzlichen Arbeitssystems möglicherweise als positiv zu werten ist, da auf diese Weise freie Kapazitäten geschaffen werden, die für zukünftige Aufträge zur Verfügung stünden und sich so auf die Folgekosten der Investition auswirken würden).

Abbildung 71 zeigt die Einbindung des Produktionsoptimierungssystems bei der Beurteilung von Investitionsausgaben auf.

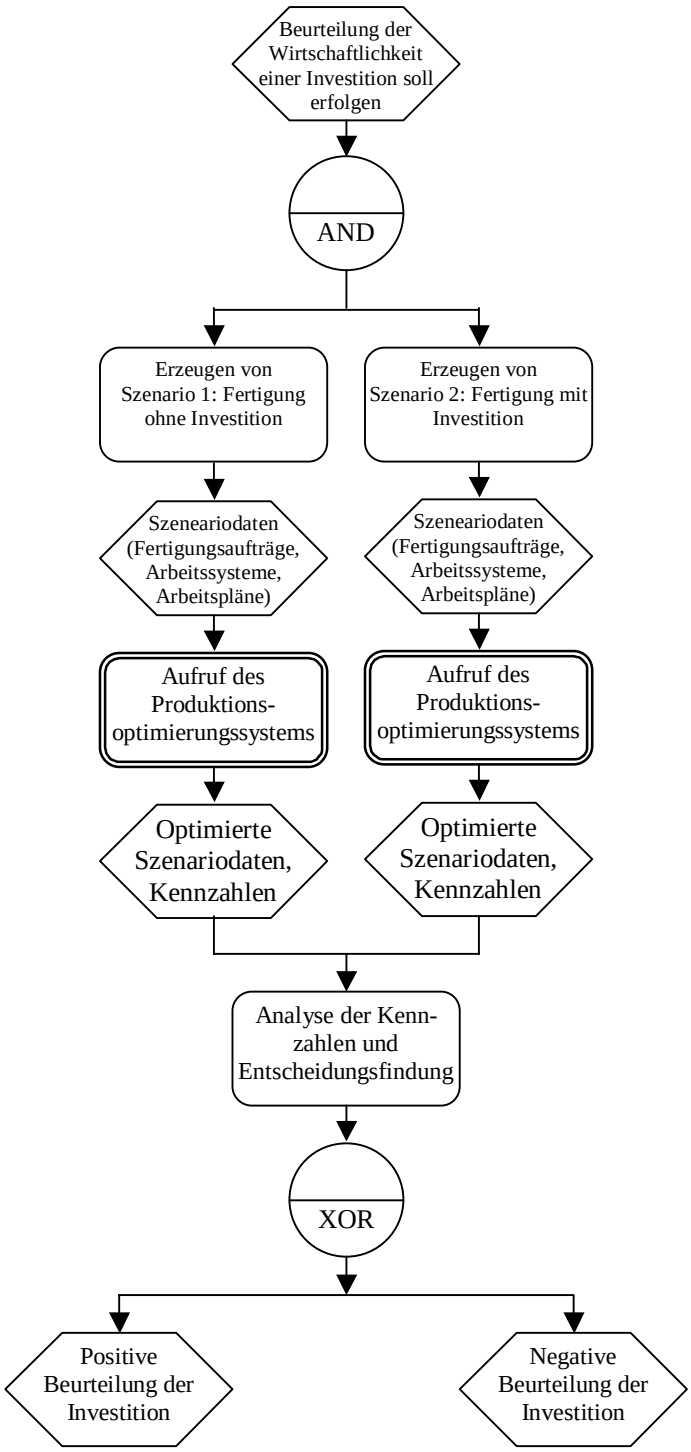

Abb. 71: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems bei der Beurteilung von Investitions-ausgaben

7. Evaluation

7.1 Hintergrund und Zielsetzung

In diesem Kapitel sollen die Konzepte des Produktionsoptimierungssystems auf seine Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit hin untersucht werden. Es ist dem Verfasser ein wichtiges Anliegen, die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Ansätze, welche in ihrer Mehrheit auf **theoretisch** orientierten, wissenschaftlichen Abhandlungen beruhen, auch von der **Praxisseite** her zu durchleuchten. Vor diesem Hintergrund bildeten sich im Verlauf der Arbeit folgende Verfahrensweisen zur Erreichung der o.g. Zielsetzung heraus:

(1) Die Durchführung einer **empirischen Untersuchung** darüber, inwieweit in existierenden Unternehmen bereits ähnliche Ansätze verwendet werden; hierzu würden Fragebögen an eine möglichst hohe Anzahl von Unternehmen verschickt und ausgewertet werden.

(2) Die Durchführung einer Art **Fallstudie** in **einem** Unternehmen dahingehend, auf welche Weise die Einführung des Produktionsoptimierungssystems erfolgen könnte, welche Probleme dabei auftreten und inwiefern von den beschriebenen Konzepten profitiert werden könnte.

Der Verfasser entschied sich für die Durchführung der Fallstudie. Der fehlende empirische Charakter der Untersuchung erscheint dem Verfasser als weniger schwerwiegend, da mit dem Einsatz eines komplexen Systems, wie es der Produktionsoptimierer darstellt, in jedem Fall auf die jeweiligen, unternehmens-spezifischen Umstände und Erfordernisse eingegangen werden muß, um tatsächlich von den Ergebnissen der Produktionsoptimierung profitieren zu können. Des weiteren wäre die Durchführung einer Untersuchung mit empirischem Charakter aufgrund der möglichst hohen Zahl an betrachteten Unternehmen schon allein aus Aufwandsgründen mehr „ein Kratzen an der Oberfläche“, während im Rahmen der Durchführung einer Fallstudie ein tieferes Eindringen in die Materie möglich ist.

Für die Durchführung der Fallstudie stellte sich freundlicherweise die MTU Friedrichshafen GmbH zur Verfügung.

7.2 Die MTU Friedrichshafen GmbH als Untersuchungsgegenstand

Die MTU Friedrichshafen, ein Unternehmen der DaimlerChrysler AG, ist weltweit Technologieführer bei Antriebssystemen für Schiffe, Bahnen, Schwerfahrzeugen und dezentrale Energieanlagen. Das Produktprogramm mit Dieselmotoren von 30 bis 9000 kW, Gasmotoren, Gasturbinen und Brennstoffzellen ist das modernste und umfassendste der Branche. MTU liefert nicht nur Motoren, sondern komplette Antriebsanlagen mit integraler Steuerung und Überwachung. Bekannt sind MTU-Antriebe für ihre hohe Leistung bei gleichzeitig geringem Gewicht und sehr kompakten Abmessungen. MTU ist die zentrale Marke des DaimlerChrysler-Bereichs Powersystems Off-Highway, der mit weltweit 7500 Mitarbeitern einen Umsatz von 1,6 Mrd. Euro erzielt[175].

[175] Kurzdarstellung der MTU durch die Pressestelle des Unternehmens; Vgl. auch MTU (2001)

Für die Durchführung der Fallstudie stand Herr Dipl.-Ing. Hans-Peter Wehrle freundlicherweise als Ansprechpartner zur Verfügung. Herr Wehrle ist Leiter des Bereichs Operations (Abteilung TO) und als solcher verantwortlich für Produktionsablauf und -steuerung[176].

7.3 Aufbau der Fallstudie

Die Durchführung der Fallstudie orientierte sich an folgendem Aufbau:

(1) Zunächst wurden die grundlegenden Ansätze und Konzepte des Produktionsoptimierungssystems vorgestellt und anschließend aus Sicht der MTU auf ihren Inhalt hin bewertet. Dabei sollte speziell auf Grenzen und Probleme eingegangen werden. Man beachte, daß es sich hierbei um **subjektiv** geprägte, also nicht allgemeingültige Aussagen handelt.

(2) Anschließend wurde die Fragestellung behandelt, welche der mit dem Produktionsoptimierungssystem verwandten Konzepte innerhalb der MTU bereits wie angewendet werden.

(3) Schließlich erfolgte eine Diskussion darüber, mit welchem Maßnahmen die Einführung des Produktionsoptimierungssystems bei der MTU verbunden wäre und auf welche Weise hier eine Anwendung innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung in Frage käme.

Die Ergebnisse der Fallstudie sind in den folgenden Abschnitten wiedergegeben.

7.4 Teil 1 der Fallstudie: Vorstellung der Ansätze, Bewertung

7.4.1 Wandlungsfähigkeit und Flexibilität

Der Begriff der **Wandlungsfähigkeit** im Sinne des Sonderforschungsbereichs 467 wird in dieser Form nicht in der MTU verwendet. Demgegenüber spielt die **Flexibilität** innerhalb des Unternehmens, und besonders im Produktionsbereich, eine **herausragende Rolle**. Dies resultiert daraus, daß sich die Randbedingungen für die MTU in den letzten Jahren stark veränderten. Während noch vor zehn Jahren der Anteil des Behördengeschäfts am Gesamtumsatz eine dominante Stellung einnahm, konzentriert sich das Unternehmen neben dem immer noch vorhandenen Behördengeschäft verstärkt auf zivile Märkte, für die mehrere neue Motorenbaureihen entwickelt wurden. Mit der damit verbundenen **Steigerung der Gesamtabsatzzahlen** und **veränderter Kundenanforderungen** an Preis, Lieferzeiten und Ausstattungsvarianten ergibt sich die Notwendigkeit zur Verwendung neuer, innovativer und flexibler Fabrikstrukturen. Des weiteren ist der **Planungshorizont**, in welchem sich noch verläßliche Prognosen hinsichtlich Geschäftsentwicklung und Absatzzahlen erstellen lassen, in den letzten Jahren aufgrund der zunehmenden **Turbulenz** der Märkte stetig geschrumpft, so daß sich auch vor diesem Hintergrund der Zwang zur Verwendung flexibler Strukturen ergibt.

7.4.2 Fabriklayoutplanung und dynamische Fabrikstrukturen

[176] Stand August 2001

Der Ansatz verschiebbarer Arbeitssysteme wird prinzipiell als brauchbar, ja sogar notwendig bezeichnet. Probleme ergeben sich speziell bei größeren Maschinen, welche über ein besonderes Fundament in den Boden der Produktionsstätte eingesetzt werden müssen. Des weiteren sind bei der Positionierung von Maschinen, die einen Schadstoffausstoß verursachen, die vorhandenen Einrichtungen zum Ausführen von Abgasen zu beachten.

Die dynamische Anpassung von Aufstellungsorten von Arbeitssystemen eignet sich demnach also besonders für kleinere Maschinen.

7.4.3 PPS- und CIM-Systeme, Simulationswerkzeuge

Produktionsplanung und –steuerung ist vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt her immer nötig. Dem Einsatz von computergestützten **PPS- und CIM-Systemen** als Allheilmittel, ohne Anpassung der Produktionssysteme an die Anforderungen der Produktionsaufgabe, wird hingegen äußerst kritisch gegenüber gestanden. Wörtliches Zitat von Herrn Wehrle: „CIM in der Form der früheren 80er Jahre hat bei uns nicht die gewünschten Ergebnisse gebracht“[177]. Mit einem integrierten PPS-System wurde damals versucht, die arbeitsteilige Fertigung komplexer Teile mit vielen Störgrößen in den Griff zu bekommen. Dies hat in Bezug auf die Transparenz durchaus funktioniert. Die wichtigen Ziele Termintreue, kurze Durchlaufzeiten und Reduzierung der Umlaufbestände wurden aber nur mangelhaft erreicht. Zur Simulation des Fertigungsablaufs wurde vor Durchführung der Reengineering-maßnahmen aus 7.5.1 der Einsatz des Prozeßsimulierungstools SIMPLE++[178] erprobt, der Versuch führte jedoch ebenfalls zu keinem befriedigendem Ergebnis.

Das Scheitern der meisten computergestützten Ansätze bei der MTU wird zum einen durch die **mangelhafte Übereinstimmung von Modell und Realität** bei hochkomplexen Sachverhalten begründet: Die Realität wird vom Modell des CIM-Systems nur unvollständig und in ungenügender Weise wiedergegeben. So existieren innerhalb der Fertigung der MTU über 40.000 Fertigungspläne. Durch die Zunahme der Anzahl der komplexitätsbestimmten Störgrößen ergibt sich eine zu große Abweichung von Modell und Realität, welche den Einsatz eines CIM-Systems nicht mehr rechtfertigt.

Zum anderen mangelte es den computergestützten Verfahren in der Vergangenheit an **Akzeptanz** seitens der Meister im Fertigungsbetrieb. Die Systeme wurden nicht als Werkzeug aufgefaßt, sondern als realitätsfremde Maschinen, die irgendwelche unsinnigen Vorgaben machten oder sich in die Bereiche der Eigenverantwortung der Werkstattmeister einmischten.

Schließlich mangelte es an der **Kommunikation** von Problemen an das CIM-System. Da die Anpassung des CIM-Modells Spezialisten erfordert, wurden Probleme bei der Fertigung nicht zum CIM-System durchgereicht, sondern durch pragmatische Lösungen ersetzt, die keine Abbildung im Modell fanden. Die Folge war eine weitere Diskrepanz zwischen Realität und Abbildung.
Eine **Simulation** des gesamten Fertigungsablaufs wird aufgrund der Komplexität des Systems als mit heutigen Mitteln nicht durchführbar angesehen. Eine Anwendung ist

[177] Im Rahmen eines Interviews am 8. August 2001
[178] entwickelt von der Firma Tecnomatix Technologies Ltd.; das System ist jetzt unter der Bezeichnung eM-Plant auf dem Markt. Vgl. eM-Plant (2001)

nur auf Ebene von Teileinheiten möglich. Die Schaffung von Teileinheiten zur Komplexitätsreduktion ist folglich Voraussetzung für den Einsatz von Simulationswerkzeugen. Auf der Ebene von Teileinheiten wird die Simulation dann als sinnvolles Werkzeug zur Bestimmung von Engpässen betrachtet.

7.5 Teil 2 der Fallstudie: Angewandte Methoden in der MTU

7.5.1 Organisatorische Maßnahmen zur Schaffung von Flexibilität

Die früher vorherrschende Form der arbeitsteiligen Fertigung ließ nur noch bedingt eine wettbewerbsfähige Produktion zu. Aus diesem Grund erfolgte ein Reengineering über den gesamten Produktionsbereich.

Dabei erfolgte zunächst im Rahmen eines „Make or Buy"-Prozesses eine Reduzierung der Fertigungstiefe, womit für die Reorganisation der Fertigung Platz geschaffen wurde. Anschließend geschah eine Teilefamilienbildung über das verbliebene Teilespektrum. Für die Fertigung dieser Teilefamilien wurden dann neue „Fertigungsinseln" aus vorhandenen und neu investierten Maschinen und Anlagen aufgebaut. Unter „Fertigungsinsel" wird dabei die räumliche Zusammenfassung aller Betriebsmittel zur möglichst kompletten Bearbeitung einer Teilefamilie verstanden. Dies umfaßt die Direktanlieferung der Rohteile, die Bearbeitung, Prüfvorgänge sowie das Entgraten, Waschen und Verpacken der Teile. Gleichzeitig wurde die bisher zentrale Arbeitsvorbereitung dezentralisiert und den Fertigungsinseln soweit wie möglich auch räumlich zugeordnet. Diese weitgehende Aufhebung des Verrichtungsprinzips trug zu deutlich mehr Transparenz bei. Gleichzeitig wurde die Eigenverantwortung der verantwortlichen Meister und Planungsteams in Bezug auf Termineinhaltung, Qualität und Kosten gestärkt. Die Ergebnisse sind eine meßbar bessere Termineinhaltung, weniger Aufwand für die Fertigungssteuerung („Terminjäger") und eine deutliche Reduzierung der Durchlaufzeiten.

Die beschriebenen Maßnahmen wurden zunächst für die Teilefamilien der variantenreichen Produkte in kleinen Stückzahlen durchgeführt (A-Teile im Sinn der ABC-Analyse[179], betriebsintern „Exoteninseln"). Parallel erfolgte die Entwicklung und Serieneinführung der neuen, für die zivilen Märkte entwickelten Produkte, die heute in wesentlich größeren Stückzahlen gefertigt werden als die alten Produkte. Die Fertigung der neuen Produkte wurde ebenfalls nach dem Prinzip der Fertigungsinseln organisiert („Rennerinseln"). Dabei wurden die neuen „Rennerinseln" möglichst parallel zu den bestehenden „Exoteninseln" der gleichen Teilefamilie angeordnet (z.B. Zylinderköpfe). Die „Exoteninseln" stellen zudem Ausweichkapazitäten für den Fall dar, daß die gewünschte Ausbringungsmenge an „Rennerteilen", sei es wegen eines Maschinenausfalls oder aufgrund einer Periode mit Überlastbetrieb, nicht allein auf den „Rennerinseln" produziert werden kann. So kann jede „Exoteninsel" auch bei Bedarf, zumindest teilweise, Kapazitätsspitzen bei den „Rennerinseln" abdecken. Ein weiterer Vorteil ist der flexible Personalaustausch zwischen den Inseln.

Bei Neuinvestitionen wurde Wert darauf gelegt, daß möglichst viele **Universalmaschinen** des gleichen Herstellers bzw. Typs beschafft wurden. Dies erlaubt bei nachhaltigen Verschiebungen der Kapazitätsauslastung eine Kapazitätsverlagerung

[179] Vgl. Wöhe (1993), S. 523ff., Zahn/Schmid (1996), S. 331ff.

zwischen den Fertigungsinseln oder die Umsetzung von Maschinen (**Anpassungsflexibilität**). Es erlaubt ferner bei steigendem Kapazitätsbedarf auch die Ergänzung der Fertigungsinseln um weitere Maschinen (**Erweiterungsflexibilität**). Zusätzlich ist aufgrund der durchgängig identischen Bedienung der Einsatz von Personal auf jeder beliebigen Universalmaschine ohne große Einarbeitungszeiten möglich (**Personalflexibilität**).

Insgesamt wird eine **Entflechtung** des Fertigungsablaufs über **die Minimierung der Anzahl der Arbeitsgänge** angestrebt. Durch unmittelbare Durchführung mehrerer Arbeitsschritte auf einem Arbeitssystem entfallen so (je nach Möglichkeit) Liege- und Transportzeiten.

7.5.2 Fabriklayoutplanung und dynamische Fabrikstrukturen

In Abschnitt 7.4.2 wurde bereits auf die Probleme dynamischer Fabrikstrukturen bei großen Spezialmaschinen hingewiesen. Im Rahmen der in Abschnitt 7.5.1 beschriebenen organisatorischen Ansätze wird diese Methode bei Maschinen, die direkt auf dem Hallenboden aufgestellt werden können („Hakenmaschinen“), bei längerfristigen Kapazitätsauslastungsänderungen oder verändertem Produktspektrum angewendet. Bei kurzfristiger Änderung der Kapazitätsanforderungen und dem Vorhandensein von möglichst vielen gleichartigen Bearbeitungsmaschinen kann ein Ausgleich aber auch über mehrere Fertigungssegmente hinweg erfolgen. Das Grundprinzip hierbei lautet: Verzicht auf feste Installationen, soweit möglich.

Die eigentliche Layoutplanung geschieht unter Verwendung des Systems ERGOMASS[180]. Die Festlegung des Layouts erfolgt nach dem Grundsatz, den Fluß der Teile durch das Fertigungssystem so störungsfrei wie möglich zu gestalten (**Fließprinzip**).

7.5.3 PPS und CIM

Die veränderten Produktionsstrukturen werden immer noch mit dem gleichen PPS-System betrieben. Durch die transparenten Strukturen und dem sich daraus ergebenden klaren Materialfluß sind die früheren Probleme an der Übergängen der arbeitsteiligen Fertigung nicht mehr vorhanden. Das PPS-System setzt, basierend auf den Plandaten des Vertriebs, an, welche Menge an welcher Fertigungsinsel in welchem Zeitraum zu produzieren ist. Dies geht von den Montagezeitpunkten aus, an denen die Teile montagefertig vorliegen müssen. Durch Herunterbrechen dieser Werte werden die Soll-Werte der Produktion für jede Fertigungsinsel ermittelt. Sie hängen an jeder Fertigungsinsel aus, so daß eine fortlaufende Kontrolle zwischen Soll- und Ist-Werten der Produktion möglich ist. Für die Bauteile der „Rennerinseln“ wird ein KANBAN-System[181], ausgehend vom Verbrauch in der Montage, angewendet (Pull-Prinzip).
Die Verwendung von Produktionsablaufsimulatoren wie SIMPLE++ befindet sich erneut im Versuchsstadium. Es wird gegenwärtig untersucht, wie ein solches System unter Verwendung der neuen Organisationsstrukturen aus Abschnitt 7.5.1 eingesetzt und seine Akzeptanz durch die Meister in der Fertigung sichergestellt werden kann.

[180] Es handelt sich dabei um ein Planungswerkzeug zur effizienten Gestaltung und Optimierung von manuellen und teilautomatisierten Arbeitssystemen, entwickelt von der Firma DELMIA GmbH – Vgl. DELMIA (2001)
[181] Vgl. Bloech/Bogaschewsky/Götze/Roland (1993), S. 316ff.

Dabei soll dem Meister innerhalb eines Zeitfensters ein Auftragsvolumen vorgegeben werden, mit dem er die Auftragsreihenfolge optimieren kann.

Grundsätzlich herrscht die Meinung vor, daß CIM-, PPS- und Simulations**werkzeuge** immer nur als solche angesehen werden dürfen und niemals die Kommunikation zwischen den Verantwortlichen beim Auftreten von Problemen und der Suche nach Lösungen ersetzen sollen.

7.6 Teil 3 der Fallstudie: Möglichkeiten und Voraussetzungen für den Einsatz des Produktionsoptimierungssystems

7.6.1 Einführung des Produktionsoptimierungssystems

Der Verfasser dieser Arbeit teilt die grundsätzlichen Bedenken in Bezug auf die universelle Einsetzbarkeit von CIM-Technologien. Die Grenzen von CIM sind wissenschaftlich hinterlegt[182]. Auch die Akzeptanz als Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines Anwendungssystems ist unbestritten[183].

Vor diesem Hintergrund stimmt der Verfasser der Ansicht zu, daß die Schaffung von **transparenten Produktionsstrukturen** durch Komplexitätsreduktion und Zerlegung in möglichst autonome Teileinheiten für den Einsatz von Optimierungsstrategien notwendige Voraussetzung ist. Um Herrn Wehrle zu zitieren: „Nur ein erkanntes Problem kann gelöst werden“[184].

Ferner ist es notwendig, bestimmte Handlungsspielräume zu gestalten, innerhalb welcher die Optimierung durchgeführt werden kann. Dies kann zum einen im Zuge der Produktionsplanung durch die Ausgestaltung von Pufferzeiten geschehen (vgl. Kapitel 4.7), zum anderen durch die Schaffung von Reservekapazitäten / Redundanz innerhalb des Produktionsapparates. In diesem Zusammenhang ist die Verlegbarkeit von Arbeitsschritten zwischen einzelnen Arbeitssystemen zur Umgehung von Engpässen eine interessante Fragestellung, auf deren Basis ein entsprechendes zukünftiges Teilmodul des Produktionsoptimierungssystems ausgestaltet werden kann.

Die Einführung des Produktionsoptimierungssystems geschieht dann simultan auf Ebene der geschaffenen Teileinheiten (d.h. auf jeder Teileinheit erfolgt der Einsatz einer Instanz des Produktionsoptimierungssystems). Aufgrund der reduzierten Komplexität ist die Erfassbarkeit der Szenariodaten (vgl. Kapitel 5.2) sowie die Qualität der Simulationsdaten gewährleistet. Des weiteren wirkt sich der reduzierte Umfang der Daten positiv auf die Ausführungszeiten der einzelnen Teilmodule aus. Besonders bei der Anwendung interaktiver Fabriklayoutplanungssysteme ist die Konzentration auf wenige, zusammenhängende Arbeitssysteme von Vorteil.

Nicht übersehen werden darf die Akzeptanzproblematik. Hierfür ist zuallererst eine offene Kommunikation zwischen allen Beteiligten notwendig. Der Verfasser ist weiter der Ansicht, daß das Produktionsoptimierungssystem nicht direkt auf den Fertigungsinseln zum Einsatz kommen sollte, sondern in das übergeordnete

[182] Vgl. Geitner (1996), S. 292
[183] Vgl. Mumford/Welter (1984), S. 18ff.
[184] Im Rahmen eines Interviews am 8. August 2001

Produktionsplanungssystem zu integrieren sei, in welchem die Festlegung der einzelnen Produktionsmengen für jede Fertigungsinsel geschieht. Durch die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Engpässen, Anordnung der Arbeitssysteme und Terminierung der Arbeitsschritteschritte ist so die frühzeitige Einplanung der Inanspruchnahme von Reservekapazitäten möglich. An der Eigenverantwortlichkeit der Werkstattmeister ändert sich nichts, da unter Zuhilfenahme des Produktionsoptimierungssystems nur die Plandaten in Form der Soll-Werte der produzierenden Mengen abgestimmt werden.

7.6.2 Anwendungsmöglichkeiten

Von den in Kapitel 6 aufgeführten, denkbaren Anwendungsmöglichkeiten erscheint im Rahmen der MTU vor allem die **Produktionsplanung** als praktikabel (vgl. die Ausführungen des vorigen Abschnitts).

Bei der Beurteilung von **Investitionen** für neue Arbeitssysteme ist es vorrangiges Ziel der MTU, daß die Investitionsausgaben **nachhaltig** gedeckt sind. Dies ist vor dem Hintergrund der in Abschnitt 7.5.1 beschriebenen organisatorischen Maßnahmen zu sehen: So muß sich ein neues Arbeitssystem in das Konzept der Universalmaschinen und Fertigungsinseln einfügen. Durch die hohen Anschaffungskosten und die langen Abschreibungszeiträume der Arbeitssysteme wird eine **langfristige** Beurteilung der Rentabilität einer Neuinvestition gefordert, die über den Einsatz des Produktionsoptimierungssystems hinausgeht. Investitionsentscheidungen sind nicht zuletzt auch von strategischer Bedeutung für die MTU und dürfen deshalb nicht automatisiert werden.

Die **Auftragsannahme** vollzieht sich bei der MTU bewußt unter **Verzicht** auf jegliche Form von **Automatismus**. Die Produktionsplanung richtet sich vor allem nach den Daten des Vertriebs (und damit des Auftragsbestands). Dies liegt bei der MTU in der Natur der erstellten, komplexen Produkte begründet. Fertigungsaufträge können typischerweise erst nach einigen Monaten nach Eingang der Bestellung abgeschlossen werden. Zur selteneren, kurzfristigen Annahme von Aufträgen werden bei der MTU zunächst die vorhandenen Kapazitäten und Reserven betrachtet. Anschließend wird überlegt, auf welche Weise der Zusatzauftrag unter Ausnutzung von Reserven eingeplant werden könnte und zu welchem Zeitpunkt die Fertigstellung möglich wäre. Hierbei werden bewußt nicht die Kapazitätsauslastungen der bereits eingeplanten Fertigungsaufträge angegriffen. Das Produktionsoptimierungssystem könnte bei dieser manuellen Betrachtungsweise Hilfestellung geben. Eine vollständig automatisierte Entscheidungsfindung darüber, ob ein Auftrag angenommen wird oder nicht, hält der Verfasser jedoch für nicht sinnvoll.

7.7 Fazit der Fallstudie

Zusammenfassend ergibt sich als **Kernaussage** der Fallstudie, daß die in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze des Produktionsoptimierungssystems als grundsätzlich **nützlich** beurteilt werden. Die Anwendung muß jedoch auf der Ebene **organisatorischer Teileinheiten** erfolgen, da die Komplexität des Gesamtsystems Fertigung als zu hoch einzustufen ist, als daß es in seiner Gesamtheit von einem einzelnen Optimierungssystem abgedeckt werden könnte.

8. Schlußbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Produktionsoptimierungssystem greift auf die Ansätze des CIM zurück, wonach im Anschluß an die organisatorische Restrukturierung des Fertigungsbereichs die Anbindung aller Produktionsanlagen an ein zentrales (ERP-) System erfolgt. Die dort abgelegten Daten spiegeln die Abläufe innerhalb der Fertigung wider und werden zur Ansteuerung der angebundenen Arbeitssysteme verwendet.

Das Produktionsoptimierungssystem versucht, darauf aufbauend, durch eine integrierte Betrachtungsweise der relevanten Fertigungsdaten einen Produktionsablauf zu finden, der gewissen Optimalitätskriterien hinsichtlich verschiedener Kennzahlen des Fertigungsbereichs genügt. Dies wird erreicht, indem Teilsysteme zur Anpassung des Fabriklayouts und der Struktur der Arbeitssysteme (Fabriklayoutplanung) sowie zur zeitlichen Feinplanung des Fertigungsablaufs (Auftragsterminierung) aufgerufen und ihre Ergebnisse über die Simulation des Ablaufgeschehens ausgewertet werden. Der auf diese Weise vom Produktionsoptimierungssystem ermittelte optimale Ablauf kann dann im Fertigungsbereich umgesetzt werden.

Das Produktionsoptimierungssystem ist als offenes System konzipiert worden, welches die Anbindung weiterer Module oder die Ersetzung der vorhandenen in einfacher Weise zuläßt. Auf diese Weise soll die Anpassungsfähigkeit an veränderte Rahmenbedingungen und Aufgabenstellungen gewährleistet werden.

8.2 Schlußbewertung des Produktionsoptimierungssystems

Der Verfasser hält das Produktionsoptimierungssystem in der beschriebenen Form für nützlich, um bei den in Kapitel 6 beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten Hilfestellung zu geben. Trotzdem darf nicht übersehen werden, daß das Produktionsoptimierungssystem als **Werkzeug** konzipiert wurde und als solches zu verstehen ist. Speziell hält es der Verfasser für ungerechtfertigt, komplexe Entscheidungsverfahren, wie sie in der Produktion beispielsweise bei der Auftragsannahme und bei Investitionsentscheidungen auftreten, allein auf Grundlage von **Automatismen** zu lösen. Vielmehr ist weiterhin der Spezialist gefordert, der sich in der Materie auskennt und bei seiner Arbeit von den eingesetzten Werkzeugen **unterstützt** wird.

Die offene Architektur des Produktionsoptimierungssystems sollte seine Einsatzmöglichkeit auch im Rahmen zukünftiger Problemfelder gewährleisten. Zur Umsetzung der Wandlungsfähigkeit eines Unternehmens kann das Produktionsoptimierungssystem besonders innerhalb des Prozesses - Generieren möglicher Lösungen, Bewertung anhand aussagekräftiger Größen und Vergleich von Alternativen - beitragen. Die Anwendungsmöglichkeiten des Produktionsoptimierungssystems sind hierbei nicht von vornherein festgelegt, sondern ergeben sich je nach Einsatzgebiet und Anforderungen.

8.3 Durchführung der Arbeit

Die Durchführung der Arbeit erwies sich aufgrund der Komplexität des Bearbeitungsthemas als abwechslungsreich und sehr herausfordernd.

Probleme traten in den Anfangsphasen aufgrund der **erschwerten Kommunikationsmöglichkeiten** innerhalb des Sonderforschungsbereichs 467 hinsichtlich der Inhalte der anzusteuernden Teilsysteme Fabriklayoutplanung und Auftragsmanagementprüfstand auf. Dies war auf den ungünstigen Zeitraum der Anfangsphase der Arbeit zurückzuführen, welcher in die Vorbereitungsphase einer für das Fraunhofer Institut wichtigen Präsentation fiel. Dennoch konnten schließlich alle Zusammenhänge geklärt werden.

Ein anderes Problem ergab sich aus der **Aufgabenstellung** selbst. Bei näherer Beschäftigung mit den Hintergründen der produktionswirtschaftlichen Theorie kamen sowohl der Verfasser als auch die Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs 467 zu der Erkenntnis, daß das Produktionsoptimierungssystem, falls es sich allein auf die Einbindung der Teilsysteme Auftragsmanagementprüfstand und Fabriklayoutplanung stützen würde, unverhältnismäßig viel Aufwand für ein vergleichsweise **geringes Optimierungspotential** treiben würde (resultierend daraus, daß das Fabriklayout-system lediglich die Transportzeit beeinflussen würde und der Auftragsmanagement-prüfstand nur zur Simulation diente; vgl. die Ausführungen in Kapitel 3.2). Der Verfasser ist der Ansicht, mit der Einbindung des Teilsystems **Auftragsterminierung** (vgl. Kapitel 4.7) sowie der generellen **offenen** Systemarchitektur des Produktions-optimierers (vgl. Kapitel 5) eine zufriedenstellende Lösung gefunden zu haben.

Ansonsten konnte die Durchführung der Arbeit zügig und ohne weitere große Schwierigkeiten erfolgen. An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich Herrn Dipl.-Ing. Hans-Peter Wehrle von der MTU Friedrichshafen Dank ausgesprochen, der sich für den praktischen Teil (Kapitel 7) als Ansprechpartner zur Verfügung stellte und mit Rat und Tat zur Seite stand.

Stuttgart, im August 2001

Literaturverzeichnis

Baan (2001) Ohne Verfasser: iBaan – the new line, Executive overview. Verfügbar unter http://www.baan.com/ibaan, Zugriffsdatum 25. August 2001

Bamberg/Baur (1996) Bamberg, Günter; Baur, Franz: Statistik. München u.a.: Oldenbourg 1996

Bloech/Bogaschewsky/Götze/Roland (1993) *Bloech, Jürgen; Bogaschewsky, Ronald; Götze, Uwe; Folker, Roland:* Einführung in die Produktion, 2., überarb. und erw. Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag 1993

Blohm (1988) Blohm, Hans: Produktionswirtschaft, 2., unveränd. Auflage. Herne/Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe 1988

Booch/Rumbaugh/Jacobson (1999) Booch, Grady; Rumbaugh, Jim; Jacobson, Ivar: Das UML-Benutzerhandbuch. Bonn u.a.: Addison-Wesley-Longmann 1999

Buck-Emden/Galimow (1996) Buck-Emden, Rüdiger; Galimow, Jürgen: Die Client/Server-Technologie des SAP-Systems R/3: Basis für betriebswirtschaftliche Standardanwendungen, 3. Auflage. Bonn u.a.: Addison-Wesley 1996

Corsten (1992) Corsten, Hans: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement, 3., überarb. und wesentlich erw. Auflage. München u.a.: Oldenburg-Verlag 1992

Dean/Allen/Aloimonos (1995) Dean, Thomas; Allen, James; Aloimonos, Yiannis: Artificial Intelligence, Theory and Practice. Redwood City u.a.: The Benjamin/Cummings Publishing Company 1995

DELMIA (2001) Ohne Verfasser: Lösungen für die Layoutplanung – Layout Planer. Verfügbar unter http://www.eai-delta.de/solutions/html/layoutpl.htm, Zugriffsdatum 15. August 2001

Domschke/Scholl/Voß (1993) Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin; Voß, Stefan: Produktionsplanung, Ablauf-organisatorische Aspekte. Berlin u.a.: Springer-Verlag 1993

eM-Plant (2001) Ohne Verfasser: eM-Plant – Plant, Line and Process Simulation & Optimization. Verfügbar unter http://www.tecnomatix.com/showpage.asp?page=256, Zugriffsdatum 17. August 2001

Fandel (1991) Fandel, Günter: Produktion I, Produktions- und Kostentheorie, 3., neu bearb. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1991

Geitner (1996) Geitner, Uwe: CIM (Computer Integrated Manufacturing). In: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2., völlig neu gestaltete Auflage. Kern, Werner (Hrsg.): S. 292-311. Stuttgart: Schäffer-Poschel 1996

Gileadi (1999) Gileadi, Ido: Integration Package Process over Multiple Application Platforms. In: Handbook of data management.

Purba, Sanjiv (Hrsg.): Chapter 76. Danvers: CRC Press LLC 1999

Gutenberg (1983) Gutenberg, Erich: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band I: Die Produktion, 24. Auflage. Berlin u.a.: Springer-Verlag 1983

Johansson/McHugh/Pendlebury/Wheeler (1993) Johansson, Henry J.; McHugh, Patrick; Pendlebury, A. John; Wheeler, William A.: Business Process Reengineering, Breakpoint Strategies for Market Dominance. Chichester: John Wiley & Sons 1993

Heinkel (2000) Heinkel, Uwe: Informationsmodelle für wandlungsfähige Produktionssysteme. Diplomarbeit Nr. 1846, Fakultät Informatik, Universität Stuttgart 2000

Kern (1992) Kern, Werner: Industrielle Produktionswirtschaft, 5. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poschel 1992

Kern (1996) Kern, Werner: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2., völlig neu gestaltete Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poschel 1996

Macharzina (1999) Macharzina, Klaus: Unternehmensführung: das internationale Managementwissen; Konzepte – Methoden – Praxis, 3., aktualisierte und erw. Auflage. Wiesbaden: Gabler 1999

Mercer (1992) Mercer, David: Marketing. Oxford u.a.: Blackwell Publishers 1992

Microsoft (2001) Ohne Verfasser: Enterprise Solutions, Studies, Wireless & Solution Providers. Verfügbar unter http://www.microsoft.com/mobile/enterprise/default.asp, Zugriffsdatum 25. August 2001

MTU (2001) Ohne Verfasser: Das ist MTU, Die MTU-Friedrichshafen – Motoren und Systemtechnik. Verfügbar unter http://www.mtu-friedrichshafen.com/de/frameset/f_th.htm, Zugriffsdatum 20. August 2001

Mumford/Welter (1984) Mumford, Enid; Welter, Günter: Benutzerbeteiligung bei der Entwicklung von Computersystemen, Verfahren zur Steigerung der Akzeptanz und Effizienz des EDV-Einsatzes. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1984

Oracle (2001) Ohne Verfasser: Oracle E-Business Suite. Verfügbar unter http://www.oracle.com/applications/index.html, Zugriffsdatum 25. August 2001

REFA (1985) REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Planung und Steuerung, Band 3, 4. Auflage. München 1985

Rich/Knight (1991) Rich, Elaine; Knight, Kevin: Artificial Intelligence, Second Edition. New York: McGraw-Hill 1991

Rogers/Upton/Williams (1992) Rogers, Paul; Upton, David M.; Williams, David J.: Computer Integrated Manufacturing. In: Handbook of Industrial Engineering, Second Edition. Salvendy, Gavriel (Hrsg.), S. 647-673. New York: John Wiley & Sons 1992

SAP (1997) Ohne Verfasser: BAPIs - Einführung und Überblick. Walldorf: SAP AG 1997

SAP (2001) Ohne Verfasser: mySAP.com – Solutions for the *New*, New Economy. Verfügbar unter http://www.sap.com/solutions, Zugriffsdatum 25. August 2001

Schwarze (1990) Schwarze, Jochen: Netzplantechnik, 6. Auflage. Herne/Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe 1990

Stahlknecht/Hasenkamp (1997) Stahlknecht, Peter; Hasenkamp, Ulrich: Einführung in die Wirtschaftsinformatik, 8., vollst. Überarb. und erw. Auflage. Berlin u.a.: Springer-Verlag 1997

Stommel (1976) Stommel, Heinz Joseph: Betriebliche Terminplanung, Berlin u.a.: Springer-Verlag 1976

Warnecke (1984) Warnecke, Hans-Jürgen: Der Produktionsbetrieb: eine Industriebetriebslehre für Ingenieure. Berlin u.a.: Springer-Verlag 1984

Westkämper (1999) Sonderforschungsbereich 467: Ergebnisbericht 1997, 1998, 1999. Universität Stuttgart 1999

Westkämper/Zahn/Balve/Tilebein (1999) Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich; Balve, Patrick; Tilebein, Meike: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen – ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: wt Werkstattstechnik 89 (1999) 9

Wöhe (1993) Wöhe, Günter: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 18., überarb. und erw. Auflage. München: Verlag Franz Vahlen 1993

Yeung (1999) Yeung, Miles Au: Helping Network Managers Cope with Enterprise Transformation and Data Demands. In: Handbook of data management. Purba, Sanjiv (Hrsg.): Chapter 77. Danvers: CRC Press LLC 1999

Yu/Zhang (1992) Yz, Po L.; Zhang, Dazhi: Multicriteria Optimization. In: Handbook of Industrial Engineering, Second Edition. Salvendy, Gavriel (Hrsg.), S. 2672-2692. New York: John Wiley & Sons 1992

Zahn/Schmid (1996) Zahn, Erich; Schmid, Uwe: Produktionswirtschaft I: Grundlagen und operatives Produktionsmanagement. Stuttgart: Lucius und Lucius 1996

Zäpfel (1982) Zäpfel, Günther: Operatives Produktionsmanagement. Berlin u.a.: Springer-Verlag 1982

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Das Produktionssystem als Subsystem der Unternehmung 6
Abb. 2: Systematisierung der Produkte 7
Abb. 3: System industrieller Produktionsfaktoren 8
Abb. 4: Produktionsprozeß 9
Abb. 5: Typische Struktur der Durchlaufzeit 10
Abb. 6: Durchlaufzeiten 11
Abb. 7: Bausteine der partizipativen Fabrikplanung 14
Abb. 8: Globaler Optimierer als Steuerkomponente 17
Abb. 9: Ablauf einer Optimierung mit Evolutionsstrategien 18
Abb. 10: Grundsätzliche Struktur des Stufenkonzepts 20
Abb. 11: Konzeption des Produktionsoptimierungssystems 24
Abb. 12: Die Klasse `Arbeitssystem` 27
Abb. 13: Die Klasse `Produktionsstätte` 28
Abb. 14: Die Klasse `Produkt` 28
Abb. 15: Die Klasse `Schicht` 29
Abb. 16: Die Klasse `Woche` 29
Abb. 17: Die Klasse `Tag` 29
Abb. 18: Die Klasse `Intervall` 29
Abb. 19: Die Klasse `Fertigungsauftrag` 30
Abb. 20: Die Klasse `Arbeitsschritt` 31
Abb. 21: Die Klasse `Position` 31
Abb. 22: Die Klasse `Region` 32
Abb. 23: Die Klasse `Flaeche` 32
Abb. 24: Die Klasse `Datum` 32
Abb. 25: Die Klasse `Zeitdauer` 32
Abb. 26: Die Klasse `Transportmatrix` 33
Abb. 27: Die Klasse `Materialflußmatrix` 33
Abb. 28: Phasengliederung des Produktionsoptimierungsprozesses 34
Abb. 29: Die Vorphase des Produktionsoptimierungsprozesses 35
Abb. 30: Optimierungsschritte 38
Abb. 31: Suchraum in Form eines Binärbaums 39
Abb. 32: Grundsätzlicher Ablauf der Optimierungsphase 41
Abb. 33: nichtdeterministischer Ablauf der Optimierung 42
Abb. 34: modifizierter nichtdeterministischer Ablauf der Optimierung 43
Abb. 35: Die Optimierungsphase des Produktionsoptimierungsprozesses 44
Abb. 36 Ermittlung der arbeitsschrittbezogenen Durchlaufzeit 46
Abb. 37: Ermittlung der arbeitsschrittbezogenen Terminabweichung 47
Abb. 38: Ermittlung der fertigungsauftragsbezogenen Durchlaufzeit 48
Abb. 39: Ermittlung der fertigungsauftragsbezogenen Terminabweichung 49
Abb. 40: Bestimmung der Häufigkeit von Terminverzügen 51
Abb. 41: Die erweiterte Klasse `Fertigungsauftrag` 53
Abb. 42: Die erweiterte Klasse `Arbeitsschritt` 53
Abb. 43: Die erweiterte Klasse `Arbeitssystem` 54
Abb. 44: Die nochmals erweiterte Klasse Fertigungsauftrag 55
Abb. 45: Zusammensetzung der speziellen Fertigungsdurchlaufzeit 56
Abb. 46: Belastungsprofil einer Fertigungseinrichtung 65

Abb. 47: Aufbaustruktur der Netzplansymbole ... 66
Abb. 48: Auswahl des Fertigungsauftrags für den Kapazitätsabgleich ... 69
Abb. 49: Auswahl des Arbeitsschritts mit dem höchsten Terminverzug aufgrund eines Engpasses ... 70
Abb. 50: Die Klasse `Arbeitsschritt` *mit den Attributen aus der Netzplantechnik ... 70*
Abb. 51: Kapazitätsabgleich unter Verwendung von Pufferzeiten ... 71
Abb. 52: Beispiel: Fertigungsauftrag ... 72
Abb. 53: Beispiel: Fertigungsauftrag mit Engpaß ... 72
Abb. 54: Beispiel: Fertigungsauftrag mit Engpaß ... 73
Abb. 55: Beispiel: Fertigungsauftrag vorgezogenem Arbeitsschritt (5, 6) ... 73
Abb. 56: Kapazitätsabgleich durch Vorziehen eines Arbeitsschritts ... 74
Abb. 57: Konzeption des Auftragsterminierungsmoduls ... 74
Abb. 58: Aufruf der Teilsysteme durch die Optimierungsstrategie ... 76
Abb. 59: Simulation des veränderten Produktionsablaufs durch den Auftragsmanagementprüfstand ... 77
Abb. 60: Einbindung des Moduls zur Generierung der Kenngrößen aus den Simulationsdaten ... 77
Abb. 61: Bewertung des Produktionsablaufs durch das Bewertungsmodul ... 78
Abb. 62: Die Klasse `Szenario` *... 81*
Abb. 63: Direkter Zugriff der Teilsysteme am Beispiel von Optimierungsstrategie, Fabriklayoutplanung und Auftragsterminierung ... 82
Abb. 64: Indirekter Zugriff des Teilsystems Fabriklayoutplanung unter Verwendung einer Integrationskomponente ... 83
Abb. 65: Schichtmodell von SAP R/3 ... 84
Abb. 66: Zugriffsstrategie für BAPIs ... 85
Abb. 67: Schematischer Aufbau des Produktionsoptimierungssystems ... 87
Abb. 68: Neugestaltung einer Produktionsstätte unter Einbindung des Produktionsoptimierungssystems ... 89
Abb. 69: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems in den Produktionsplanungsprozeß ... 91
Abb. 70: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems in die Auftragsannahme ... 93
Abb. 71: Einbindung des Produktionsoptimierungssystems bei der Beurteilung von Investitionsausgaben ... 95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktionswirtschaftliche Auswirkungen von Veränderungen auf dem Absatzmarkt 1
Tabelle 2: Gewichtung von Fertigungsaufträgen und ihre Bedeutung *56*
Tabelle 3: Module des Produktionsoptimierungssystems mit den jeweils benötigten Daten *79*

Erklärung

Hiermit erkläre ich, diese Arbeit selbständig verfaßt und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Stuttgart, den 28.8.2001

_____

(Sven Hanssen)