

OTTO-VON-GUERICKE-  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

Marco Krist

## Echtzeitfähige Fertigungsfeinplanung einer Hybrid-Flow-Shop-Produktion



Institut für  
Logistik und Materialflusstechnik



# Echtzeitfähige Fertigungsfeinplanung einer Hybrid-Flow-Shop – Produktion

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marco Krist  
geb. am 14.11.1979 in Magdeburg

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

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk  
Univ.-Prof. Mag. et Dr. rer. soc. oec. Helmut Zsifkovits  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Leich

Promotionskolloquium am 6. Juli 2022



## Kurzfassung

**Kontext:** Die Fertigungsfeinplanung, die auch als operative Ausführungsplanung bezeichnet werden kann, stellt für produzierende Unternehmen ein bedeutendes Instrument zur Erreichung der Unternehmensziele dar. Trotz der stetig verbesserten Möglichkeiten einer Informationsgewinnung, -speicherung und -verarbeitung setzen viele Unternehmen mit einer Hybrid-Flow-Shop basierten Produktion weiterhin vorrangig auf das Erfahrungswissen der agierenden Planungsmitarbeiter. Begründet wird dieses Vorgehen mit den derzeit eingesetzten Planungssystemen, die den Anforderungen einer produktionssynchronen Produktionsfeinplanung nicht gerecht werden. Oft bilden die von den eingesetzten Planungsverfahren ermittelten Produktionspläne lediglich eine grobe Ausgangsbasis für den Planer, der durch manuelles Eingreifen eine ausführbare Maschinenbelegung erzeugt. Die Planqualität rückt dabei in den Hintergrund. Veränderte Bedingungen während der Produktion bedingen zusätzlich eine zeitnahe Planüberprüfung und ggf. Anpassung, welche aktuell eingesetzte Systeme oft nicht gewährleisten. Hohe Wirtschaftlichkeitsverluste der Unternehmen können die Folge daraus sein.

**Ziel:** In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Feinplanung einer Hybrid-Flow-Shop basierten Produktion untersucht, um den bestehenden Schwachpunkten aktueller Planungssysteme entgegenzuwirken. Grundsätzlich liegt das Bestreben in einer zielorientierten Verschiebung der Betriebskennlinien durch die Leistungssteigerung des Produktionssystems, welches durch den bestmöglichen Einsatz der Ressourcen realisiert werden kann.

**Methodik:** Die Entwicklung einer neuen Methodik zur systemgesteuerten, echtzeitfähigen Feinplanung einer Hybrid-Flow-Shop-Produktion, die alle verfügbaren Informationen zur Generierung bzw. Anpassung von Produktionsplänen berücksichtigt, stellt den ersten Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Die damit erzeugten Ergebnisse werden den einzelnen Akteuren des Unternehmens produktionssynchron bereitgestellt. Dafür wird eine Vorgehensweise zur prädikativ-reaktiven Entscheidungsfindung entwickelt, die als grundlegende Methode das Konzept eines selbstständig agierenden Feinplanungssystems ergänzt. Für eine erfolgreiche Implementierung des neuen Konzeptes bedarf es spezieller Feinplanungsverfahren für Hybrid-Flow-Shop basierte Produktionen, die gute Lösungen innerhalb kürzester Zeit bereitstellen können. Daher wird das MISO-Verfahren entwickelt und vorgestellt, welches den Anforderungen einer echtzeitfähigen Lösungsfindung von Hybrid-Flow-Shop Problemen gerecht wird und somit den zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

**Ergebnisse:** Es kann konstatiert werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion den Anforderungen einer echtzeitfähigen Entscheidungsunterstützung gerecht wird. Das vorgestellte Feinplanungssystem nutzt dazu alle verfügbaren statischen und dynamischen Informationen zur Analyse des IST-Standes und Planung zukünftiger Maßnahmen. Der (menschliche) Planer als alleiniger Entscheider tritt in den Hintergrund und hat zukünftig (nur noch) einen indirekten Einfluss auf die Entscheidungen des Feinplanungssystems. Dieses Vorgehen stellt ein Paradigmenwechsel im Planungsprozess dar. Eine erfolgreiche Erprobung des neuen Feinplanungsverfahrens MISO erfolgt mit Hilfe von realen

Produktionsdaten eines EMD-Dienstleisters. Zudem wird die hohe Leistungsfähigkeit von MISO durch den Vergleich mit Ergebnissen aktuell eingesetzter Verfahren bewiesen.

**Fazit:** In dieser Dissertation erfolgt die Auseinandersetzung mit Lösungsmöglichkeiten von komplexen Produktionsplanungsproblemen. Die Entwicklung neuer Ansätze zur echtzeitfähigen Lösung von Hybrid-Flow-Shop basierten Problemstellungen stellt eine entscheidende Erweiterung dar, um sowohl zukünftigen als auch bestehenden Anforderungen an die Feinplanung gerecht zu werden. Die vorgestellte Methodik ist zudem grundsätzlich auch auf andere Produktionssysteme übertrag- und anwendbar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Zielstellung und Forschungsfragen .....	6
1.4 Wissenschaftliche Einordnung und Abgrenzung des Themas .....	9
1.5 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	10
<b>2 Produktionswirtschaftliche Grundlagen und Forschungsbedarf .....</b>	<b>12</b>
2.1 Grundlegende Begriffe .....	12
2.2 Beschreibung und Strukturierung von Fertigungsstätten.....	13
2.3 Produkttypologie.....	16
2.4 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung.....	17
2.5 Zielsystem der Produktionslogistik .....	20
2.6 Komplexitätsbetrachtung.....	22
2.7 Herstellung elektronischer Baugruppen .....	23
2.8 Anforderungsanalyse zukünftiger Feinplanungssysteme .....	29
2.8.1 Feinplanungssysteme in der heutigen Fertigungssteuerung .....	29
2.8.2 Aufgaben bestehender Feinplanungssysteme.....	30
2.8.3 Anforderungen an zukünftige Feinplanungssysteme .....	32
2.8.4 Anforderungen an zukünftige Feinplanungsverfahren.....	36
2.9 Zusammenfassung.....	37
<b>3 Das Hybrid-Flow-Shop Problem - Fertigungsregelung und Lösungsstrategien .....</b>	<b>39</b>
3.1 Planungsstrategien einer Produktion.....	39
3.2 Möglichkeiten zur Durchführung der Fertigung.....	43
3.2.1 Modell der Fertigungsregelung.....	43
3.2.2 Ansätze zur Steuerung der Fertigung.....	44
3.3 Der Hybrid-Flow-Shop.....	48
3.3.1 Mathematische Definition .....	49
3.3.2 Lösungsverfahren HFS-basierter Problemstellungen.....	50
3.3.3 Simulationsbasierte Optimierung .....	58
3.4 Zusammenfassung.....	66
<b>4 Konzeption einer echtzeitfähigen Feinplanung für eine HFS – Produktion .....</b>	<b>69</b>
4.1 Gesamtkonzept im Überblick.....	69
4.2 Das Feinplanungssystem .....	71
4.3 Prädikative Planung zur initialen Planerstellung.....	74
4.4 Reaktive Planung zur Plananpassung.....	76
4.4.1 Störungsmanagement.....	76

4.4.2	Prinzip der reaktiven Phase.....	81
4.5	Analyse- und Visualisierungsfunktionen .....	83
4.6	Zusammenfassung.....	83
<b>5</b>	<b>Das MISO – Verfahren .....</b>	<b>86</b>
5.1	Problemdefinition .....	86
5.2	Ansatz und Aufbau des MISO-Verfahren .....	88
5.2.1	Allgemeiner Überblick.....	88
5.2.2	Der produktionsstufenbasierte Allokationsalgorithmus.....	91
5.2.3	Der maschinenbasierte Sequenzierungsalgorithmus .....	92
5.3	Der hybride Simulationsansatz .....	95
5.4	Zusammenfassung.....	98
<b>6</b>	<b>Evaluierung des MISO-Verfahrens .....</b>	<b>99</b>
6.1	Simulationsumgebung.....	99
6.2	Randbedingungen der experimentellen Untersuchung.....	101
6.2.1	Auswahl der Szenarien .....	101
6.2.2	Datengrundlage der Experimente.....	103
6.2.3	Untersuchte Feinplanungsverfahren .....	105
6.3	Analyse der durchgeführten Experimente .....	106
6.3.1	Zykluszeit $C_{max}$ .....	106
6.3.2	Anzahl verspäteter Aufträge $U$ .....	108
6.3.3	Mittlere Auftragsverspätung $\bar{T}$ .....	109
6.3.4	Anzahl Hauptrüstungen der ersten (SMD-) Stufe $MS_1$ .....	110
6.3.5	Ergebnisse der Szenarien zwei bis fünf .....	111
6.3.6	Gewichtete Zielwertermittlung.....	113
6.4	Zusammenfassung.....	115
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>116</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>123</b>
	<b>Anhang A .....</b>	<b>144</b>
A1:	Szenario 1 (MAX) .....	144
A2:	Szenario 2 .....	148
A3:	Szenario 3 .....	152
A4:	Szenario 4 .....	156
A5:	Szenario 5 .....	160



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Profitabilität von Kundenbeziehungen und Dauer der Geschäftsbeziehung.....	1
Abbildung 1.2: Einordnung der Fertigungsfeinplanung in die Supply Chain Matrix .....	3
Abbildung 1.3: Fehlerkreis der Produktionssteuerung [Plossl 1973; nach Wiendahl 2010, S. 253] ....	6
Abbildung 1.4: Dilemma der Ablaufplanung [Gutenberg 1971, 147 ff.] .....	7
Abbildung 1.5: Zielsetzung der vorliegenden Arbeit .....	8
Abbildung 1.6: Fokus der Arbeit, angelehnt an [Gierth & Schmidt 2007, S. 665; März et al. 2011, S. 4] .....	9
Abbildung 1.7: Vorgehensweise der Arbeit.....	11
Abbildung 2.1: Produktion als Kombinationsprozess [Blohm et al. 2016, S. 16 f.] .....	12
Abbildung 2.2: Klassifizierung einer Auswahl von Fabrikarten, in Anlehnung an [Schenk et al. 2014, S. 51] am Beispiel eines mittelständischen EMS-Dienstleisters.....	14
Abbildung 2.3: Merkmal der Betriebstypologie – Ablaufart in der Teilefertigung.....	15
Abbildung 2.4: Darstellung der Produkttypologie [Schenk & Wojanowski 2000] am Beispiel eines mittelständischen EMS-Dienstleisters .....	16
Abbildung 2.5: Einteilung der Produktionsplanung und -steuerung [Hackstein 1984, S. 9] .....	17
Abbildung 2.6: Das Aachener PPS-Modell als aggregiertes Prozessmodell [Schuh 2007, S. 21].....	18
Abbildung 2.7: Modell der Produktionssteuerung [Lödding 2016, S. 8] .....	19
Abbildung 2.8: Zielsystem der Produktionslogistik [Wiendahl 2010, S. 252].....	20
Abbildung 2.9: Verlauf von Leistung, Durchlaufzeit und Kosten eines Arbeitsplatzes abhängig vom Bestand [Nyhuis und Wiendahl 2012, S. 178].....	21
Abbildung 2.10: Beispiel einer SMT-Linie, in Anlehnung an [Torenko & Associates 2017] .....	24
Abbildung 2.11: Problemklassen eines Optimierungsproblems [März et al. 2011, S. 30] .....	25
Abbildung 2.12: Einordnung der Fertigungssteuerung nach dem ISA-95 Standard, in Anlehnung an [ANSI/ ISA-95.00.03 2013].....	29
Abbildung 2.13: Fertigungsplanerzeugung durch den Einsatz aktueller Feinplanungssysteme .....	30
Abbildung 2.14: Aktualisierung/ Anpassung des Fertigungsplans im betrieblichen Ablauf.....	31
Abbildung 2.15: Anforderungen an zukünftige Systeme und Verfahren .....	38
Abbildung 3.1: Framework zur Plananpassung im dynamischen Umfeld, modifiziert nach [Vieira et al. 2002, S. 44] .....	40
Abbildung 3.2: Modell einer Fertigungsregelung [Kienzle 2011, S. 23].....	43
Abbildung 3.3: Steuerungsstrategien zur Produktionsregelung [Niehues 2016, S. 21] .....	44

Abbildung 3.4: Hybrid-Flow-Shop als Organisationsform der Fertigung in Anlehnung an .....	48
Abbildung 3.5: Ansätze zur Lösung von Scheduling Problemen, in Anlehnung an .....	51
Abbildung 3.6: Algorithmus zum allgemeinen Ablauf von Verbesserungsfahren [Pinedo 2005, S. 424].....	53
Abbildung 3.7: Einordnung bekannter Metaheuristiken [Dréo 2011].....	54
Abbildung 3.8: Reinforcement Learning, Agent und Umgebung [Amiri et al. 2018] .....	56
Abbildung 3.9: Schematischer Ablauf einer ereignisdiskreten Simulation [März et al. 2011, S. 16] .	59
Abbildung 3.10: Zustandsveränderungen eines ereignisdiskreten Prozessmodells .....	60
Abbildung 3.11: Zustandsveränderungen eines System-Dynamics Prozessmodells.....	61
Abbildung 3.12: Zustandsveränderungen eines Discrete-Rate Prozessmodells .....	61
Abbildung 3.13: Einordnung des mesoskopischen Simulationsansatzes .....	62
Abbildung 3.14: Zustandsveränderungen eines mesoskopischen Prozessmodells .....	63
Abbildung 3.15: Kopplungsmöglichkeiten von Simulation und Optimierung, .....	64
Abbildung 3.16: Verteilung der untersuchten Zielgrößen der untersuchten Arbeiten [Ruiz & Vázquez-Rodríguez 2010] .....	66
Abbildung 4.1: Gliederung von Kapitel 4 und 5 gemäß der auferlegten Zielstellung.....	69
Abbildung 4.2: Gesamtkonzept der echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion.....	70
Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau des prädikativ- reaktiven Konzeptes.....	71
Abbildung 4.4: Aufbau des entwickelten Feinplanungssystems .....	72
Abbildung 4.5: Datenmodell des entwickelten Konzepts.....	73
Abbildung 4.6: Ablauf der prädikativen Planerstellung.....	75
Abbildung 4.7: Handhabung unterschiedlicher Störungsarten während der Produktion .....	77
Abbildung 4.8: Ablaufschema beim Auftreten von Störungen des zeitlichen Ist- zum Planverlauf...	79
Abbildung 4.9: Beispiel eines Produktionsplans <i>PP</i> mit einer zeitlichen Störung .....	80
Abbildung 4.10: Ablauf einer reaktiven Planänderung .....	82
Abbildung 5.1: Produktionsstufenbasierte Zerlegung einer HFS-Produktion .....	89
Abbildung 5.2: Verfahrensansatz der Feinplanung .....	90
Abbildung 5.3: Algorithmus zur zentralen Auftragsverteilung, in Anlehnung an [Nahhas 2017, S. 58], angepasst und erweitert zur Nutzung für eine reaktive Planerstellung .....	91
Abbildung 5.4: Algorithmus der Familienebene, modifiziert und erweitert nach [Nahhas 2015, S. 49].....	93
Abbildung 5.5: Algorithmus der Auftragsebene, modifiziert und erweitert nach [Nahhas 2015, S. 49].....	94
Abbildung 5.6: Prozessablauf während der Simulation einer Produktionsstufe.....	95

---

Abbildung 5.7: Aggregiertes Vorgehen während der Simulation bei ereignisdiskret abgebildeten Prozessen .....	96
Abbildung 5.8: Ratenbasiertes Vorgehen während der Simulation des Bearbeitungsprozesses .....	97
Abbildung 6.1: Obere Hierarchieebene des Max-Szenarios [ExtendSim 9.1] .....	100
Abbildung 6.2: Hybride Modellierung am Beispiel einer Maschine der ersten (SMD-) Stufe.....	101
Abbildung 6.3: Vierstufige HFS-Produktion eines EMS-Dienstleisters .....	102



---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Kombinatorische Explosion von Scheduling-Problemen in Anlehnung an.....	23
Tabelle 3.1: Bewertung ausgewählter Verbesserungsverfahren für die vorliegende Problemstellung gemäß durchgeführter Literaturrecherche (Auswahl).....	68
Tabelle 6.1: Szenarien-Auswahl zur Erprobung des MISO-Verfahrens.....	101
Tabelle 6.2: Experimentell untersuchte HFS-Problemstellungen.....	102
Tabelle 6.3: Identische Daten der untersuchten Szenarien.....	103
Tabelle 6.4: Individuelle Daten-Charakteristik der untersuchten Szenarien.....	104
Tabelle 6.5: Ermittelte Zykluszeiten $C_{max}$ (in min) der Datensätze des Max-Szenarios.....	107
Tabelle 6.6: Anzahl verspäteter Aufträge $U$ der Datensätze des Max-Szenarios.....	108
Tabelle 6.7: Mittlere Verspätung $\bar{T}$ (in min) relevanter Aufträge des Max-Szenarios.....	109
Tabelle 6.8: Anzahl Hauptrüstvorgänge $MS_1$ an Produktionsstufe eins des Max-Szenarios.....	110
Tabelle 6.9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien eins - fünf.....	111
Tabelle 6.10: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung des Max-Szenario.....	114
Tabelle 6.11: Gewichtete Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente .....	115



## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

$\alpha$	Notation der Maschinencharakteristika
$\alpha_1$	Maschinenumgebung
$\alpha_2$	Anzahl der Produktionsstufen
$\alpha_3$	Art der Maschinen
$\alpha_4$	Anzahl paralleler Maschinen auf einer Produktionsstufe
$A$	Akzeptanzwahrscheinlichkeit
$\beta$	Notation der Restriktionscharakteristika
$B_m$	Mittlerer Bestand
$\gamma$	Notation der Zielkriterien
$\gamma_{1-4}$	Notation unterschiedlicher Zielkriterien
$C_{max}$	Zykluszeit
$C_j = c_{js}$	Fertigungszeit von Auftrag $j$ an Produktionsstufe $s$
$c_{js}$	Fertigstellungszeitpunkt von Auftrag $j$ an Stufe $s$
$c_i$	Zu normierender Zielwert
$c_i^{min}$	Maximaler Wert aller zu normierenden Werte
$c_i^{max}$	Minimaler Wert aller zu normierenden Werte
$r_i$	Normierte Zielgröße ( $0 \leq r_i \leq 1$ )
$D_j$	Realisierter Fertigstellungstermin eines Auftrags $j$
$d_j$	Tage bis zur Fälligkeit eines Jobs $J_j$
$e_i$	Ereignistyp
$E_j$	Earliness (Frühzeitigkeit) des Auftrags $j$
$F_{i,s}$	Familie von Auftrag $j$ der Produktionsstufe $s$
$F_j$	Durchlaufzeit eines Auftrags $j$
$FHS$	Hybrid-Flow-Shop mit $s$ Produktionsstufen
$G$	Generierungswahrscheinlichkeit
$\mathbb{H}$	Menge aller Zeitpläne
$HFS$	Hybrid-Flow-Shop Problem
$I^{frei}$	Menge aller frei verplanbaren Aufträge

$I^{fix}$	Menge aller fixierten Aufträge
$I^{prod}$	Menge aller Aufträge in Bearbeitung
$J_j$	Menge von $n$ Jobs ( $j = 1, \dots, n$ )
$j$	Index für einen Auftrag
$J_s$	Job-Shop mit $s$ Produktionsstufen
$L_m$	Mittlere Leistung
$L_{max}$	Maximale Verspätung
$L_j$	Verspätung des Auftrags $j$
$m$	Anzahl paralleler Maschinen
$M$	Maschine
$MS_1$	Anzahl Hauptrüstungen der ersten (SMD-) Stufe
$O_j$	Auszuführende Operationen
$PP^{akt}$	Aktuell gültiger Produktionsplan
$PP^{akt\_t}$	Temporär gültiger Produktionsplan
$p_{js}$	Bearbeitungszeit, die der Auftrag $j$ in Stufe $s$ benötigt
$P$	Übergangswahrscheinlichkeit
$r_j$	Freigabezeitpunkt von Auftrag $j$
$S_j$	Menge von $s$ Produktionsstufen ( $s = 1, \dots, n$ )
$S_{s,g,h}$	Rüstzeit an einer Maschine $M_i$ einer Produktionsstufe $s$
$s$	Index für eine Produktionsstufe
$t^{akt}$	Aktueller Zeitpunkt
$t_{ij}^{pro\_start}$	Produktionsstartzeitpunkt von Auftrag $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^C$	Fertigstellungszeitpunkt von Auftrag $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^{C\_V\_start}$	Startzeitpunkt der Verzögerung von Auftrag $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^{C\_V\_end}$	Endzeitpunkt der Verzögerung von Auftrag $j$ an Maschine $i$
$t_{ij+1}^{sk\_start}$	Starttermin des Rüstprozesses von Auftrag $j + 1$ an Maschine $i$
$t_{ij+1}^{sk\_end}$	Endtermin des Rüstprozesses von Auftrag $j + 1$ an Maschine $i$
$\bar{T}$	Mittlere Verspätung
$\tau_d$	Systemdurchlaufzeit
$\bar{\tau}_d$	Mittlere Systemdurchlaufzeit
$\bar{\tau}_\alpha$	Mittlere Ankunftsintervallzeit



---

$T_j$	Genormte Verspätung eines Auftrags $j$
$U$	Anzahl verspäteter Aufträge
$\omega$	Gewichtung
$\omega_{1-4}$	Gewichtungsanteile
$ZDL_m$	Mittlere Durchlaufzeit



## Abkürzungsverzeichnis

AOI	Automated Optical Inspection
APO	Advanced Planning & Optimization
APS	Advanced Planning and Scheduling
BBV	Bestellbestandsverfahren
BDE	Betriebsdatenerfassung
BIP	Bruttoinlandsprodukts
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BOS-F	Belastungsorientierte Fertigungssteuerung
C	Coating
CONWIP	Constant Work In Process
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-Physisches System
DBF	Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung
DE	Discrete Event
DES	Discrete Event Simulation
DR	Discrete-Rate
EBIT	Earnings Before Interest and Taxes
EDD	Earliest Due-Date
EMS	Electronic Manufacturing Services
ERP	Enterprise Resource Planning
FKT	Elektrischer Funktionstest
FP	Familienproduktion
GA	Genetischer Algorithmus
HFS	Hybrid-Flow-Shop
HV	High Voltage
ICT	In Circuit Test
IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleinere und Mittlere Unternehmen
KOBRA	Kapazitätsorientierte und Bestandsgeregelte Auftragsfreigabe
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed Integer Linear Program

MISO	Modular Integrierte Simulationsgestützte Optimierung
MRP	Material Requirements Planning
MS	Mesoskopische Simulation
ML	Maschinelles Lernen
OTD	On Time Delivery
PFB	Pull-From-Bottleneck
POLCA	Paired Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization
PP	Produktionsplan
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
RL	Reinforcement Learning
SA	Simulated Annealing
SD	System-Dynamics
SMD	Surface-Mounted Devices
SMT	Surface-Mount-Technology
SPI	Solder Paste Inspection
SPT	Shortest Production Time
SS	Selective Soldering
SVM	Support Vector Machines
THT	Through-Hole-Technology
TS	Tabu Search
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WIP	Work In Process

# 1 Einleitung

Das Kapitel eins beschreibt zu Beginn die Motivation, die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegt. Nach der Einführung in die Problemstellung in Abschnitt 1.2 folgen die gesetzte Zielstellung, die zu beantwortenden Forschungsfragen (Abschnitt 1.3) sowie die wissenschaftliche Einordnung des Themas. Erläuterungen zur Vorgehensweise und zum Aufbau der Arbeit schließen das Kapitel ab.

## 1.1 Motivation

Das Erreichen einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit, welche auch als Quotient von Leistung durch Kosten angegeben werden kann [Kurbel & Endres 1995, S. 19], steht oft im Mittelpunkt eines produzierenden Unternehmens. Die Leistungserbringung ist dabei eng verknüpft mit den Ansprüchen des Produktabnehmers – dem Kunden. Seit einigen Jahren ist eine weitgehende Sättigung der Märkte zu beobachten, die einen Wandel vom Verkäufer- hin zu einem Käufermarkt mit sich bringt, „noch nie hatte ein Kunde so viel Macht wie heute“ [Gündling 2018, S. 3]. Der Kunde als Engpass [Günter & Helm 2006, S. 5] rückt dabei immer stärker in den Fokus, ein intensiver Wettbewerb um ihn entsteht. Ziel eines fortschrittlichen Unternehmens muss es schlussfolgernd sein, die Kundenbedürfnisse in den Mittelpunkt zu stellen, um somit einen Mehrwert für den Produktabnehmer zu schaffen<sup>1</sup>. Langfristiger Unternehmenserfolg geht oft einher mit engen Kunden-Lieferanten Beziehungen (Abbildung 1.1). Die Zufriedenheit des Kunden wird zu einer der zentralen Voraussetzungen für die Bindung, Aufrechterhaltung und Förderung der Geschäftsbeziehung [Helm et al. 2017, S. 10].

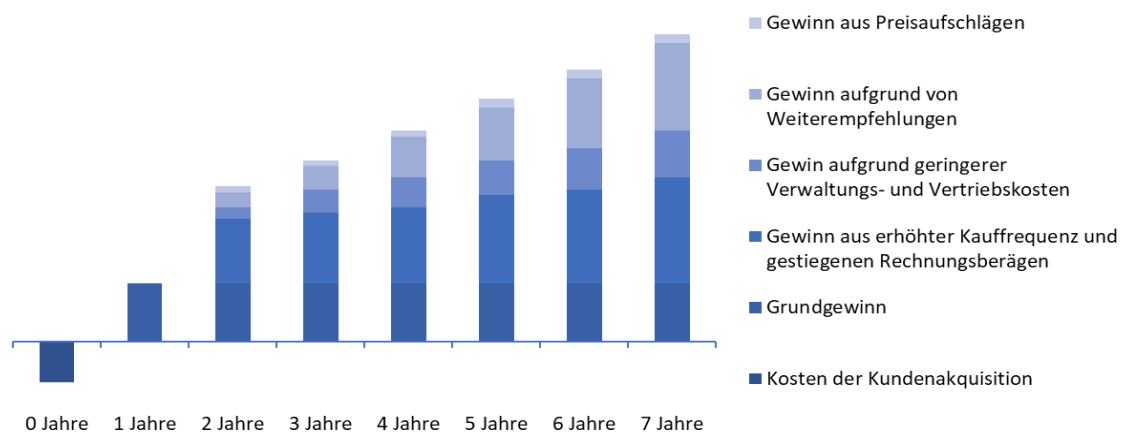


Abbildung 1.1: Profitabilität von Kundenbeziehungen und Dauer der Geschäftsbeziehung [Reichheld & Sasser 1990, S. 108]

Eine hohe Liefertreue sowie kurze Lieferzeiten sind neben Preis und Produktqualität Grundvoraussetzungen für Unternehmen, am internationalen Markt erfolgreich agieren zu können

<sup>1</sup> vgl. dazu Schenk et al. [2014, S. 101], der den Kundenwunsch bzw. den Kundenauftrag an die erste Stelle der Wertschöpfungskette setzt

[Straube & Pfohl 2008, S. 42; Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 1]. Hinzu kommt die Forderung vieler Kunden, jederzeit aktuelle (Echtzeit-) Informationen, beispielsweise über den Stand der Produktion oder bestehende Lagermengen, erhalten zu können. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine überlegene Logistikleistung die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen deutlich erhöht. Logistikführer liefern *zuverlässig, schnell* und sie sind jederzeit *informationsbereit* [Wiendahl 2008, S. 276]. Eine verstärkte Marktvolatilität und –dynamik prägt heute das wirtschaftliche Umfeld von Produktionsbetrieben. Zunehmend kürzere Reaktionszeiten für (teilweise risikobehaftete) Unternehmensentscheidungen sind die Folge [Pfohl 2018, S. 53]. Kurzzyklische Absatzschwankungen und Technologieverschiebungen sind beispielhafte Gründe dafür [Schuh & Stich 2012b, S. 195]. Hinzu kommt, dass produzierende Unternehmen zunehmend gezwungen sind, kundenindividuelle Varianten ihrer Produkte in immer kürzeren Zeiten anzubieten, um den steigenden Marktanforderungen gerecht zu werden [Schuh 2011, S. 181]. Eine Zunahme von Produktmodellen und -varianten bei gleichzeitig verkürzten Produktlebenszyklen und Durchlaufzeiten ist das Resultat [NYHUIS et al. 2010, S. 949 ff.]. Unternehmen werden vermehrt mit komplexen Planungsproblemen konfrontiert, die Ansprüche an ihre Leistungsfähigkeit und Flexibilität steigen stetig. Nyhuis und Wiendahl stellen eine proportionale Verringerung des Planungshorizonts der Fertigungssteuerung auf der einen Seite mit der Zunahme der Marktdynamik auf der anderen Seite fest [Nyhuis & Wiendahl 2010, S. 15 ff.].

Die Produktionsplanung und -steuerung als Kern eines jeden Industrieunternehmens [Corsten 2007, S. 520 ff.; Vahrenkamp & Siepermann 2008, S. 18; Günther & Tempelmeier 2012, S. 3] muss sich diesen neuen Anforderungen stellen, um die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen weiterhin sicherzustellen. Als operative Ausführungsplanung trägt die Fertigungsfeinplanung im besonderen Maße dazu bei.

Entgegen dem erkennbar notwendigen Einsatz neuer Feinplanungssysteme in der Produktionssteuerung verwenden Unternehmen heute oft (parallel zu etablierten ERP- Systemen) lokale Hilfsprogramme<sup>2</sup> auf Basis von MS Excel und MS Access. Selbst konventionelle Karteisysteme sind noch weit verbreitet [Dimitrov 2015, S. 3]. Um zukünftig den beschriebenen Herausforderungen gewachsen zu sein, müssen neue Konzepte im Bereich der Produktionsfeinplanung entwickelt und etabliert werden.

Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) erzeugen seit einigen Jahren eine stetig wachsende Datenverfügbarkeit und Transparenz in der Fertigung [Fleisch et al. 2005, S. 3; Märtens et al. 2007a, S. 471 ff.]. Die Vision einer zukünftigen digitalen, vernetzten und flexiblen Produktion kann jedoch nur mithilfe von vollautomatisierten und hochflexiblen Fertigungsprozessen gelingen [Mosler 2017, S. 493]. Dazu werden neue Ansätze und Verfahren im Rahmen der Produktionsplanung benötigt, die an eine verstärkte IT-Unterstützung angelehnt sind. An dieser Stelle soll die vorliegende Arbeit ansetzen.

## 1.2 Problemstellung

Das Problem ordnet sich in das Gebiet der operativen Fertigungsfeinplanung und -steuerung ein (Abbildung 1.2). Diese bildet die Grundlage für die Veranlassung der Produktionsprozesse eines Unternehmens und hat die Aufgabe, die Vorgaben der Produktionsprogrammplanung exakt umzusetzen und somit zur Ausschöpfung der Unternehmenspotentiale beizutragen [Günther & Tempelmeier 2012, S. 230]. Mit Hilfe der Fertigungsfeinplanung werden Startzeitpunkt, Reihenfolge und Ressourcenzuordnung der zu bearbeitenden Aufträge festgelegt.

---

<sup>2</sup> Nach (Schuh & Stich 2013) nutzen Unternehmen im Bereich der Produktion eine große Anzahl nicht standardisierter Systeme, die zum Teil Eigenentwicklungen darstellen, nicht integriert sind und fehlende Schnittstellen aufweisen.

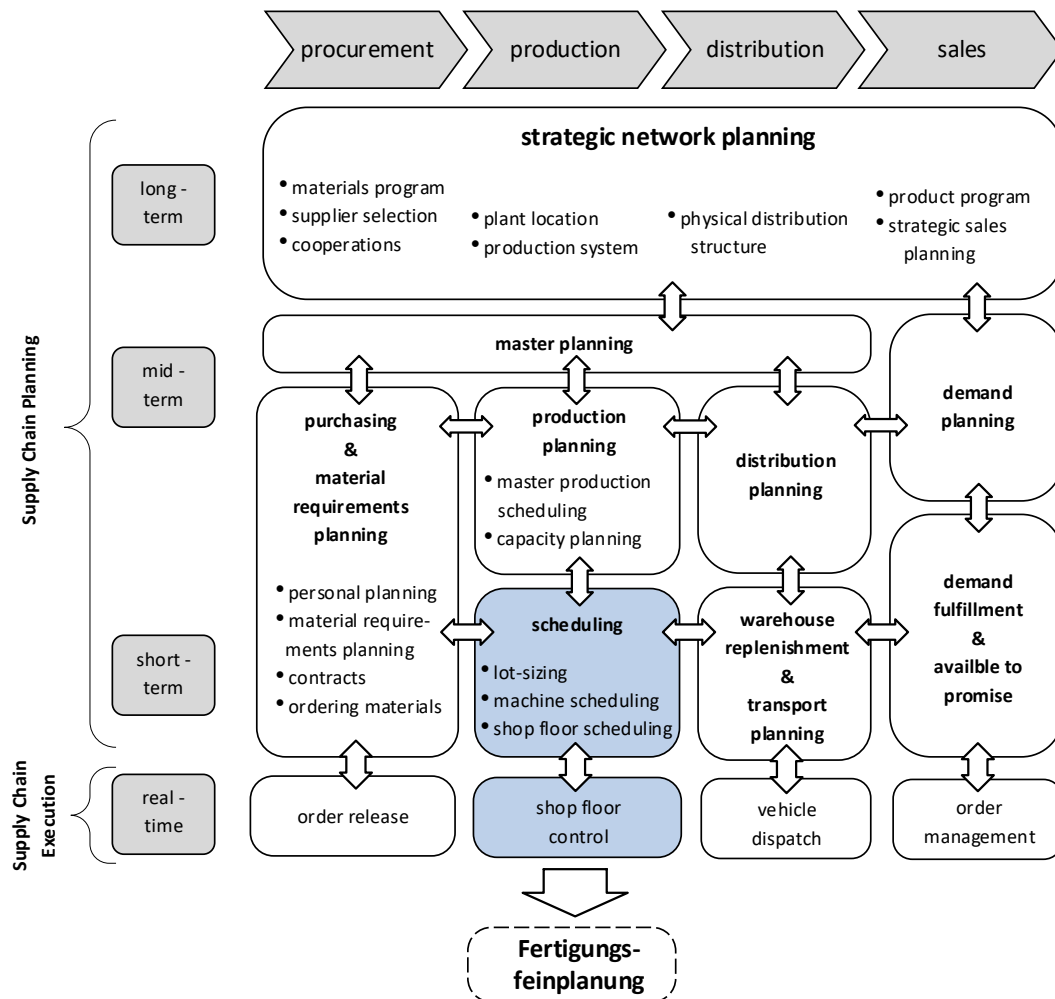


Abbildung 1.2: Einordnung der Fertigungsfeinplanung in die Supply Chain Matrix  
[Rohde et al. 2000, S. 10; Stadtler et al. 2015, S. 105]

Als eine der unteren, operativ geprägten Ebenen befindet sich die Fertigungsfeinplanung im Spannungsfeld aus kürzest benötigter Fristigkeit und höchstem Detaillierungsgrad [Schmidt 2012, S. 18]. Zusätzlich stellt die Ressourcenbelegungs- wie auch die Reihenfolgeplanung in der Praxis in vielen Unternehmen ein NP-vollständiges Problem dar (vgl. Abschnitt 2.6). Eine analytische Beschreibung aller Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge eines Produktionssystems ist aufgrund des stochastischen Charakters, nicht planbarer äußerer und innerer Einflüsse sowie plötzlich auftretender Störungen nicht möglich [Mosler 2017, S. 540].

Exakte mathematische Modelle (beispielsweise gemischt-ganzzahlige Modelle (MILP) oder Branch-and-Bound Algorithmen) können in der Praxis nur für bestimmte Teilprobleme der Produktionsfeinplanung herangezogen werden. Eine Erstellung und Verbesserung des gesamten Produktionsprogramms ist mit diesen exakten Optimierungsverfahren in angemessener Zeit nicht möglich<sup>3</sup>, vgl. [Jaehn & Pesch 2014, S. 109]: „Exakte Lösungsverfahren spielen ob der häufig sehr komplexen Problemstellungen in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle“.

<sup>3</sup> vgl. hierzu auch Zimmermann [2008, S. 423]: „In komplexen Systemen, wie z.B. mehrstufigen Produktionsbetrieben, in denen jede Maschine mit den dafür wartenden Aufträgen bereits ein Warteschlangensystem darstellt, ist die analytische Modellierung sehr schwierig oder gar unmöglich.“

Um die vorgegebenen Zielkriterien möglichst gut zu erreichen, werden in der Praxis häufig heuristische Verfahren eingesetzt, die allerdings keine Optimalität garantieren. Einfache Prioritätsregeln, zugehörig zur Gruppe der einfachen heuristischen Verfahren, nehmen einen hohen Stellenwert bei dezentralen Ansätzen zur Steuerung und Planung der Produktion ein [Pinedo 2016, S. 477]. Zentrale heuristische Verfahren wie Tabu-Search [Glover 1977, S. 156 ff.] oder Simulated Annealing [Kirkpatrick, S. C. & Gelatt 1983, S. 671 ff.; Cerny 1985, S. 41 ff.] sind Bestandteil vieler IT-Systeme im Bereich der operativen Feinplanung. Schuh et. al. stellen jedoch fest, dass die erzeugten Planungen dieser IT-Systeme stark von der Realität in der Produktion abweichen [Schuh et al. 2014a, S. 474 ff.]. Demnach ist die Feinplanung der Produktionsprozesse durch eine hohe Unzuverlässigkeit geprägt, vorhergesagte Fertigstellungstermine werden häufig nicht eingehalten [Schuh et al. 2013, S. 477 ff.]. Derzeit eingesetzte ERP-Systeme sind zudem nicht auf schnelle Reaktionen und Anpassungen ausgelegt, benötigen teilweise viele Stunden für eine neue Produktionsplanung und sind somit für die Steuerung der operativen Fertigungsfeinplanung nicht geeignet [Schuh & Fuß 2015, S. 6]. Van Brackel begründet die mangelnde Reaktionsfähigkeit aktueller Softwaresysteme auf unvorhergesehene Ereignisse mit dem starken Vereinfachen komplexer Sachverhalte im Modell sowie einer schlechten Datenqualität [Brackel 2009, S. 25; vgl. auch Pinedo 2016, S. 458]<sup>4</sup>.

Ist eine formalisierte Darstellung des Feinplanungsproblems nicht möglich oder zu komplex, werden oft simulationsbasierte Verfahren eingesetzt [Klemmt 2012, S. 37]. Die Simulation dient hierbei der Analyse, dem Design und der Optimierung der Produktionsprozesse und stellt ein bedeutsames Instrument zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung dar [Biethahn et al. 1999, S. 1]. Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung hat sich aufgrund der vorliegenden zeitdynamischen Änderungen des Produktionssystems die diskret ereignisgesteuerte Simulation durchgesetzt [Wenzel S. 2002, S. 10 ff.; Bergmann S. & Strassburger S. 2010, S. 11 ff.]. Als eines der Kernelemente erlangt die DES (Discrete Event Simulation) im Kontext der Digitalen Fabrik<sup>5</sup> eine besondere Stellung. Nachteile der ereignisdiskreten Simulationssysteme sind, bedingt durch die detaillierte Abbildung einzelner Objekte, lange Laufzeiten der Modelle sowie hohe Aufwände bei der Modellerstellung [Kuhn & Rabe 1998, S. 3; Scholz-Reiter et al. 2008, S. 118]. Für die vorliegenden komplexen Produktionssysteme ist ein Einsatz daher nur partiell bzw. in aggregierter Form möglich.

Trotz der beschriebenen Markt- und Kundenanforderungen setzen viele kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) weiterhin überwiegend konventionelle PPS-Systeme ein, welche auf Planungsverfahren wie dem klassischen Material Requirements Planning (MRP) und der Annahme statischer Randbedingungen basieren. Dieses Vorgehen führt zu einem meist suboptimalen Betrieb der Produktion [Schuh & Stich 2012b, S. 195]. Oft werden PPS-Systeme dazu genutzt, zulässige Lösungen, ohne jeglichen Optimalitätsanspruch zu generieren [Kistner & Steven 2001, S. 266]. Das Ziel besteht darin, einen durchführbaren, verständlichen Produktionsplan zu erstellen, der mitunter weit entfernt vom theoretischen Optimum liegt. Im Ergebnis ist eine falsche Produktionsplanung ein bedeutender Grund für Insolvenzen von kleinen und mittleren Unternehmen [Staab 2015, S. 121]. Zu hohe Kosten aufgrund einer geringen Auslastung und schlecht organisierte Produktionsabläufe können zu den Ursachen gezählt werden [EHK 2006, S. 20]. Produktionspläne, die mit Hilfe sukzessiv arbeitender Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme erstellt werden, haben große Nachteile bezüglich benötigter Flexibilität und Aktualität. Falsche Plan- und Vorgabezeiten, Abweichungen der

---

<sup>4</sup> Pinedo [2016, S. 458]: "The differences between real world scheduling problems and theoretical models have been the subject of a number of papers, see, for example, McKay et al. [1988], Rickel [1988], Oliff [1988], Buxey [1989], Baumgartner & Wah [1991], and van Dyke Parunak [1991]"

<sup>5</sup> VDI 4499 [2008, S. 3]: "Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt."



mittleren Durchlaufzeiten und Varianzen hinsichtlich der Rüst- und Bearbeitungsdauer führen dazu, dass die Zuverlässigkeit der erzeugten Produktionspläne teilweise bereits nach drei Tagen nur noch bei ca. 25 % liegt [Schuh et al. 2014b, S. 290].

Die verbreitete Beanstandung des sukzessiven Vorgehenskonzepts der PPS-Systeme<sup>6</sup> sowie das unzureichende Angebot an entscheidungsunterstützenden Optimierungsverfahren in den ERP-Systemen haben zu einer Entwicklung von Advanced Planning and Scheduling (APS)-Systemen geführt [BETGE 2006, S. 1]. Diese IT-Systeme sollen durch eine bessere Datennutzung die Lücke zwischen Plan- und Ist-Daten schließen und somit die Planungsqualität erhöhen [Günther & Tempelmeier 2012, S. 359]. Als Ergänzung zu den ERP-Systemen sind sie dafür mit zusätzlichen Funktionen und Verfahren ausgestattet. Leistungsfähige Algorithmen wie mathematische Optimierung oder heuristische Methoden (z. B. Genetische Algorithmen, Simulated Annealing oder Neuronale Netze) können zur Lösung komplexer Planungsaufgaben eingesetzt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Produktions- und Lieferszenarien zu simulieren (What-If-Simulation). Aufgrund ihrer Einfachheit erscheint die Lösungsqualität im Bereich der Maschinenbelegungsplanung/Reihenfolgebildung jedoch oft als nicht befriedigend. Damit ein gültiger Produktionsplan in angemessener Zeit noch berechnet werden kann, wird das komplexe Planungsproblem stark vereinfacht. Dazu bedienen sich APS-Systeme u. a. der Vorgehensweise der Disaggregation, bzw. der Verteilung von Mengenanteilen eines aggregierten Clusters (Produktfamilien, Maschinengruppen, ...) z.B. über feste Verteilungsschlüssel, welche vorab definiert werden müssen und somit den potenziellen Lösungsraum stark begrenzen [BETGE 2006, S. 36]. Aufgrund der beschriebenen und weiterer Defizite werden APS-Systeme im Schnitt bei weniger als 50% der Unternehmen eingesetzt [Schuh & Fuß 2015, S. 5].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die heutige Fertigungsfeinplanung geprägt ist durch

- eine nahezu permanente Abweichung von Plan und Realität, die durch den Planer manuell oder unter Verwendung von einfachen Hilfssystemen behoben wird,
- den Einsatz ungeeigneter IT-Systeme, denen nicht alle zur Entscheidung notwendigen Informationen vorliegen und die somit nur einfache (lückenhafte) Lösungen generieren (oft nur als Basis weiterer manueller Planungstätigkeiten),
- den Einsatz unzureichender Verfahren, die aufgrund der zeitlichen Restriktion und Komplexität des Problems nur rudimentäre (und teilweise nicht durchführbare) Pläne erzeugen, sowie
- ein mangelhaftes Störungsmanagement, welches oft ohne Systemunterstützung praktiziert wird - teilweise auch ohne den Planer, wenn dieser nicht verfügbar ist (vgl. Abschnitt 2.8.1).

Viele Unternehmen treten den zu erwartenden Störungen sowie Ungewissheiten im Produktionsablauf mit einer Erhöhung der Bestände [Kiener et al. 2012, S. 266 f.] bzw. mit dem Einplanen von Pufferzeiten entgegen, um einen reibungslosen Fertigungsablauf zu gewährleisten. Im Mittel verlängerte, zum Teil stark variierende Durchlaufzeiten sind das Ergebnis [Kingsman et al. 1989a, S. 196 ff.]. Schwankende, nicht vorherzusehende Durchlaufzeiten von Aufträgen in der Produktion lassen jedoch eine präzise Lieferterminezusage nicht zu, wodurch es zur Verringerung der Termintreue gegenüber dem Kunden kommt [Adam 1997, S. 17]. Häufig befinden sich Unternehmen so im viel beschriebenen Fehlerkreis der PPS [Plossl 1973, S. 6 f.; Mather, H., Plossl, G. W. 1977, S. 27 ff.; Kettner & Jendralski 1979, S. 410 ff.; Kettner & Bechte 1981, S. 459 ff.; Wiendahl et al. 2005, S. 464 f.], vgl.

---

<sup>6</sup> Vgl. dazu Mosler [2017, S. 535]: „Die verwendeten PPS-Systeme passen meist nicht zur Ist-Situation der Produktion und die reale Situation der Produktion weicht von den zur Planung eingesetzten Modellen und deren Prognosen stark ab.“

Abbildung 1.3. Es gilt Wege zu finden, diesen Kreis zu durchbrechen, um auch zukünftig (trotz gewiss auftretender Störungen) eine hohe Aussagegenauigkeit über die Fertigstellung der Produktionsaufträge zu erzielen und an den Kunden zu übermitteln.



Abbildung 1.3: Fehlerkreis der Produktionssteuerung [Plossl 1973; nach Wiendahl 2010, S. 253]

### 1.3 Zielstellung und Forschungsfragen

Die Fertigungsfeinplanung stellt ein bedeutendes Instrument zur Erreichung der Unternehmensziele dar und unterliegt dabei dem Dilemma der Ablaufplanung. Die in den vorigen Abschnitten beschriebene notwendige Kundenfokussierung legt den Schwerpunkt auf eine hohe Termintreue sowie kurze Lieferzeiten. Dies kann durch die Senkung der Durchlaufzeiten realisiert werden. Dem gegenüber steht die Forderung einer möglichst wirtschaftlichen Produktion. Eine hohe Auslastung der Ressourcen trägt entscheidend zur Senkung der Kosten bei. Die Kompromisslösungen können anhand von individuellen Betriebskennlinien<sup>7</sup> dargestellt werden. Die Einstellung unterschiedlicher Arbeitspunkte entlang dieser Kennlinien (z. B. durch Bestandsregelung) erzeugt veränderte Gewichtungen der (konkurrierenden) Zielgrößen. Eine Verbesserung des Gesamtsystems findet dabei in der Regel nicht statt [Hopp & Spearman 2011]. Das Bestreben soll somit in einer zielorientierten Verschiebung der Betriebskennlinien durch die Leistungssteigerung des Produktionssystems liegen (Abbildung 1.4). Dies kann durch den bestmöglichen Einsatz der Ressourcen realisiert werden und steht im Fokus dieser Arbeit.

<sup>7</sup> Abbildung 1.4 zeigt die Darstellung der Betriebskennlinie bestehend aus den Zielgrößen Auslastung und Flussgrad. Nyhuis & Wiendahl [2012, S. 23] beschreiben den Flussgrad als relatives Maß der Durchlaufzeit (bestehend aus dem Verhältnis von Durchlaufzeit zu Durchführungszeit).

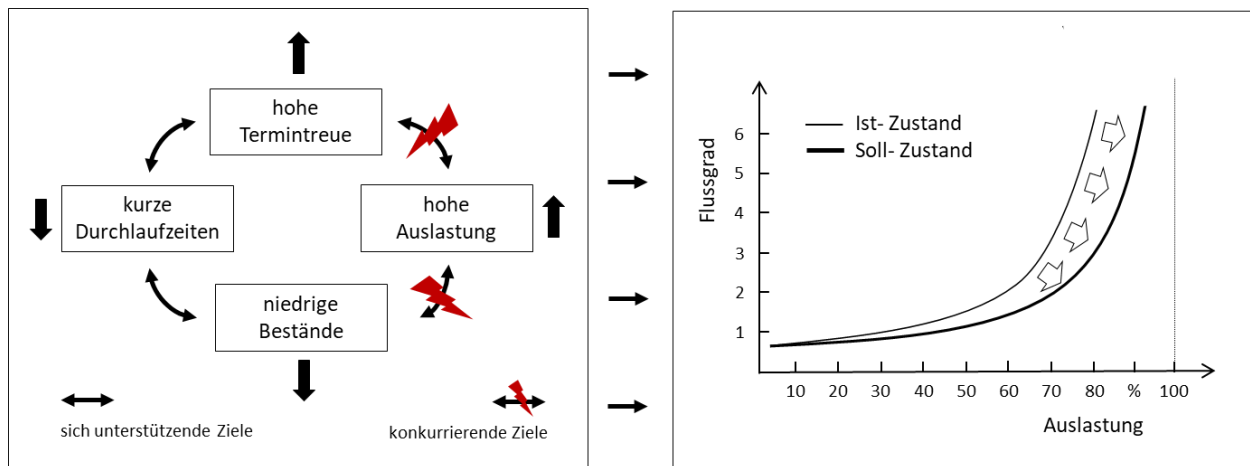


Abbildung 1.4: Dilemma der Ablaufplanung [Gutenberg 1971, 147 ff.] und zielorientierte Verschiebung der Betriebskennlinie Flussgrad/ Auslastung

Zur Lösung der Problemstellung ist eine neue Methodik<sup>8</sup> zur Fertigungsfeinplanung zu entwickeln, die den bestehenden Anforderungen gerecht wird (Abbildung 1.5).

Es lassen sich 3 Forschungsfragen ableiten:

**F1:** Wie muss ein neues, ganzheitliches Konzept zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion beschrieben werden, welches auf Grundlage von realen Produktions-, Stamm- und kalkulierten Daten sowie eintretenden Störeinflüssen agiert?

**F2:** Kann eine neue Methode<sup>9</sup> entwickelt werden, die eine echtzeitfähige, prädikativ-reaktive Entscheidungsunterstützung der Fertigungsfeinplanung ermöglicht?

**F3:** Lassen sich Verfahren<sup>10</sup> zur Feinplanung entwickeln, welche durch die Kombination von hybriden Simulationsmodellen und heuristischen Optimierungsalgorithmen onlinefähige Lösungen generieren, die trotz komplexer Problemstellungen den hohen Qualitätsanforderungen gerecht werden?

<sup>8</sup> Meyers [1987] definiert Methodik als „eine Anweisung zur methodischen, d. h. folgerichtigen und zweckmäßigen Lösung einer wissenschaftlichen Aufgabe. Nach Heyn [1999, S. 5] und Laufenberg [1995] können einer Methodik die Elemente Modell, Methode und Hilfsmittel zugeordnet werden. Nach VDI-3633 [2008, Blatt 1] wird ein Modell dabei beschrieben als "eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“, vgl. auch Arnold & Furmans [2007, S. 56] oder Schmigalla [1995, S. 243]

<sup>9</sup> Hesse et al. [1992] definiert den Begriff der Methode als „eine systematische Handlungsvorschrift (Vorgehensweise), um Aufgaben einer bestimmten Klasse zu lösen.“ So erfolgt, unter Beachtung von vorliegenden Bedingungen, die Beschreibung einer festen Schrittfolge zur Erreichung eines Ziels, wobei eine Unterstützung durch mehrere Verfahren gegeben sein kann, vgl. Schenk et al. [2014, S. 227 ff.].

<sup>10</sup> Hesse et al. [1992] beschreibt ein Verfahren als „ausführbare Vorschriften oder Anweisungen zum gezielten Einsatz von Methoden.“ Weiterführende Erläuterungen zu Arten und Auswahl von Verfahren sind beschrieben in Schenk et al. [2014, 227 ff.].

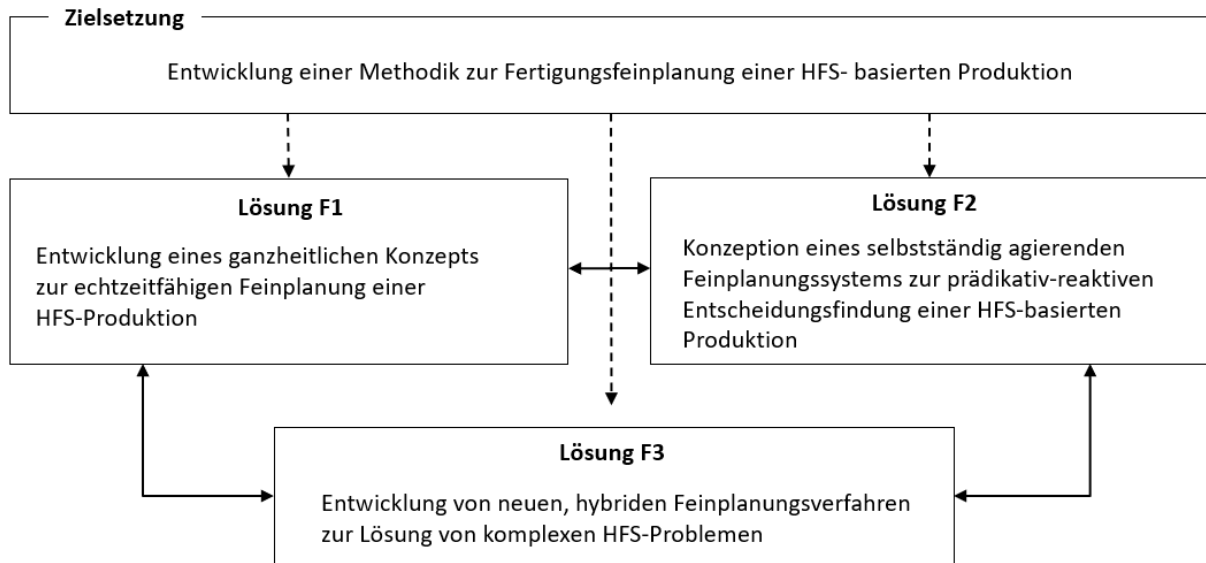


Abbildung 1.5: Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Aktuell eingesetzte Feinplanungssysteme werden als Aufruffunktion verstanden und dienen der Unterstützung des Planers (der als Entscheider im Mittelpunkt der operativen Produktionssteuerung steht und vorhandene Hilfssysteme und IT-Tools nutzt). Aufgrund der wachsenden Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung führt diese Art der Planung oft zu Fehlern und damit zu Wirtschaftlichkeitseinbußen des Unternehmens.

Als entscheidende Zielgrößen zur Verbesserung des Gesamtsystems einer Hybrid-Flow-Shop (HFS) – Produktion sollen

- die **Zykluszeit** der Produkte [Brockmann et al., S. 428 ff.],
- die **Verspätung von Aufträgen** [Wang 2005, S. 78 ff.] [Vieira et al. 2003, S. 39 ff.],
- die **Anzahl verspäteter Aufträge** [Chen & Chen 2008, S. 6415 ff.]; [Sawik 2007, S. 1373 ff.] sowie
- die **notwendige Anzahl an Hauptrüstungsvorgängen der ersten Stufe** [Nahhas 2017, S. 26]

in die multikriterielle Zielfunktion einfließen. Die Zielgrößen *Zykluszeit* sowie die (möglichst geringe) *Anzahl notwendiger Hauptrüstungsvorgänge* repräsentieren dabei den Wirtschaftlichkeitsaspekt der betrachteten Produktion während die Integration der *Anzahl verspäteter Aufträge* sowie der *durchschnittlichen Verspätung von Aufträgen* zu einer möglichst hohen Liefertermintreue führen soll. Ziel der zu entwickelnden Methodik ist es, mit Hilfe einer neuen Vorgehensweise ein Modell eines Feinplanungssystems zu beschreiben, welches kontinuierlich auf neue Informationen unter Echtzeitbedingungen reagiert und Entscheidungen adaptiv treffen kann. Es soll untersucht werden, wie durch die Kombination von unterschiedlichen Simulationsarten und heuristischen Optimierungsalgorithmen in Verbindung mit dezentralen Steuerungsmethoden neue Optimierungsverfahren entwickelt werden können, die den Anforderungen an Rechenzeit und Lösungsgüte besser gerecht werden als bereits vorhandene (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Damit entsteht ein neues Paradigma – der Planer rückt als alleiniger Ausführer und Entscheider der operativen Feinplanung in den Hintergrund. Das Feinplanungssystem übernimmt einen Großteil der Aufgaben und erweitert diese wesentlich. Der Planer als Verantwortlicher hat jederzeit die Möglichkeit des (indirekten) Eingriffs in das System.

## 1.4 Wissenschaftliche Einordnung und Abgrenzung des Themas

Diese Arbeit hat zum Ziel, sowohl einen theoretischen als auch praktischen Beitrag zur Problembewältigung zu leisten. Nach [Walter 2009, S. 30] erfolgt damit die Einordnung in den Bereich der angewandten Forschung.

Komplexe Optimierungsprobleme sind Gegenstand vieler unterschiedlicher Wissenschaftsgebiete. Im Zeitalter von Digitalisierung und Industrie 4.0 nimmt die Informatik neben den klassischen Disziplinen Mathematik, Wirtschafts- sowie Ingenieurwissenschaft an Bedeutung zu. Die simulationsgestützte Optimierung findet prinzipiell ihre Anwendungsmöglichkeit in allen Planungsphasen der Produktionsplanung, vgl. Abbildung 1.6.

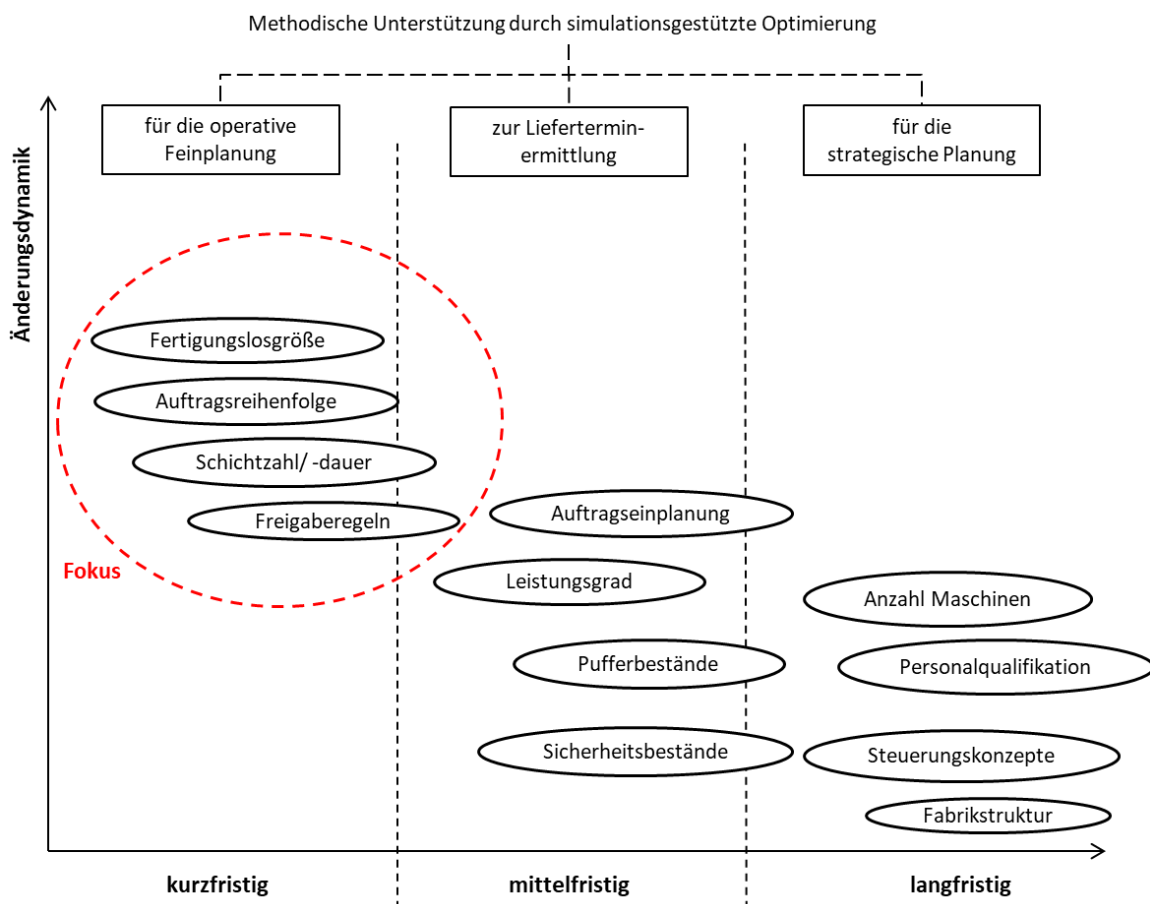


Abbildung 1.6: Fokus der Arbeit, angelehnt an [Gierth & Schmidt 2007, S. 665; März et al. 2011, S. 4]

Während der strategischen Produktionsplanung stellt die simulationsgestützte Optimierung eine methodische Unterstützung der langfristigen Planung dar, die auf Basis aggregierter, statischer Modelle erfolgt. Grundlegende Faktoren wie Fabriklayout, die Anzahl von Transportmitteln und Maschinen oder langfristig benötigte Qualifikationen werden betrachtet. Bei der kurzfristigen, operativen Planung kommen hingegen dynamische Modelle zum Einsatz, die eine deutlich höhere Genauigkeit und Komplexität aufweisen. Diese Modelle werden zur operativen Unterstützung der Produktionsfeinplanung eingesetzt und sollen u. a. Entscheidungen zur bestmöglichen Auftragsreihenfolge und -steuerung treffen. Diese Aussagen haben zunehmend einen entscheidenden Anteil am betrieblichen Erfolg. Komplexe Modelle stehen im Fokus dieser Arbeit. Kurzfristig veränderte

Systembedingungen sowie dynamische, interne und externe Einflüsse verlangen die Echtzeitfähigkeit dieser Modelle, die damit eine wesentliche Anforderung und Herausforderung darstellt. Nur so wird gewährleistet, dass eine entsprechende Reaktion und Anpassung der Parameter zeitgerecht erfolgen kann. Dazu werden ausschließlich deterministische Modelle betrachtet. Die Kombination von hybriden Simulationsmodellen mit mesoskopischem Charakter und heuristischer Optimierung als neuer Ansatz zur Lösung von komplexen und dynamischen Produktionssystemen bildet daher einen Schwerpunkt dieser Arbeit. Ziel soll es sein, eine bestmögliche zeitliche, als auch maschinenspezifische Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen unter Beachtung diverser Nebenbedingungen und Zielkriterien zu realisieren.

## **1.5 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Nach dem einleitenden Kapitel eins folgt die Betrachtung der produktionswirtschaftlichen Grundlagen sowie des aktuellen Forschungsbedarfs in Kapitel zwei. Neben Erläuterungen von Aufgaben einer PPS werden die Produktionsprozesse zur Herstellung elektronischer Baugruppen beschrieben. Die Anforderungsanalyse zukünftiger Feinplanungssysteme beendet diesen Abschnitt. Im dritten Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik formuliert, indem u. a. die verschiedenen Arten der Produktionsplanung sowie gegenwärtige Möglichkeiten der Produktionsregelung erklärt werden. Weiterhin erfolgt eine formale Beschreibung des dieser Arbeit zu Grunde liegenden Hybrid-Flow-Shop Problems sowie die in der Literatur diskutierten Möglichkeiten einer diesbezüglichen Problemlösung. In Kapitel vier folgt die Vorstellung eines neuen Konzeptes zur echtzeitfähigen Feinplanung einer Produktion mit einer HFS- basierten Produktionsumgebung, welches den ersten innovativen Teil dieser Arbeit darstellt. Das sich anschließende Kapitel fünf geht auf eine neue, speziell für den Einsatz in einer HFS- basierten Produktion entwickelte Möglichkeit der Produktionsfeinplanung – das MISO-Verfahren, ein. Im sechsten Kapitel erfolgt die entsprechende Evaluierung des MISO-Verfahrens anhand realer Problemstellungen eines EMS-Dienstleisters. Dazu werden unterschiedliche, repräsentative Szenarien genutzt und verschiedene Feinplanungsverfahren miteinander verglichen. Das sich anschließende Kapitel sieben richtet das Augenmerk auf die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse, die umfassend dargestellt und diskutiert werden. Abschließend beinhaltet Kapitel acht die Zusammenfassung der Arbeit sowie einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf. Abbildung 1.7 stellt die Vorgehensweise in dieser Arbeit graphisch dar.

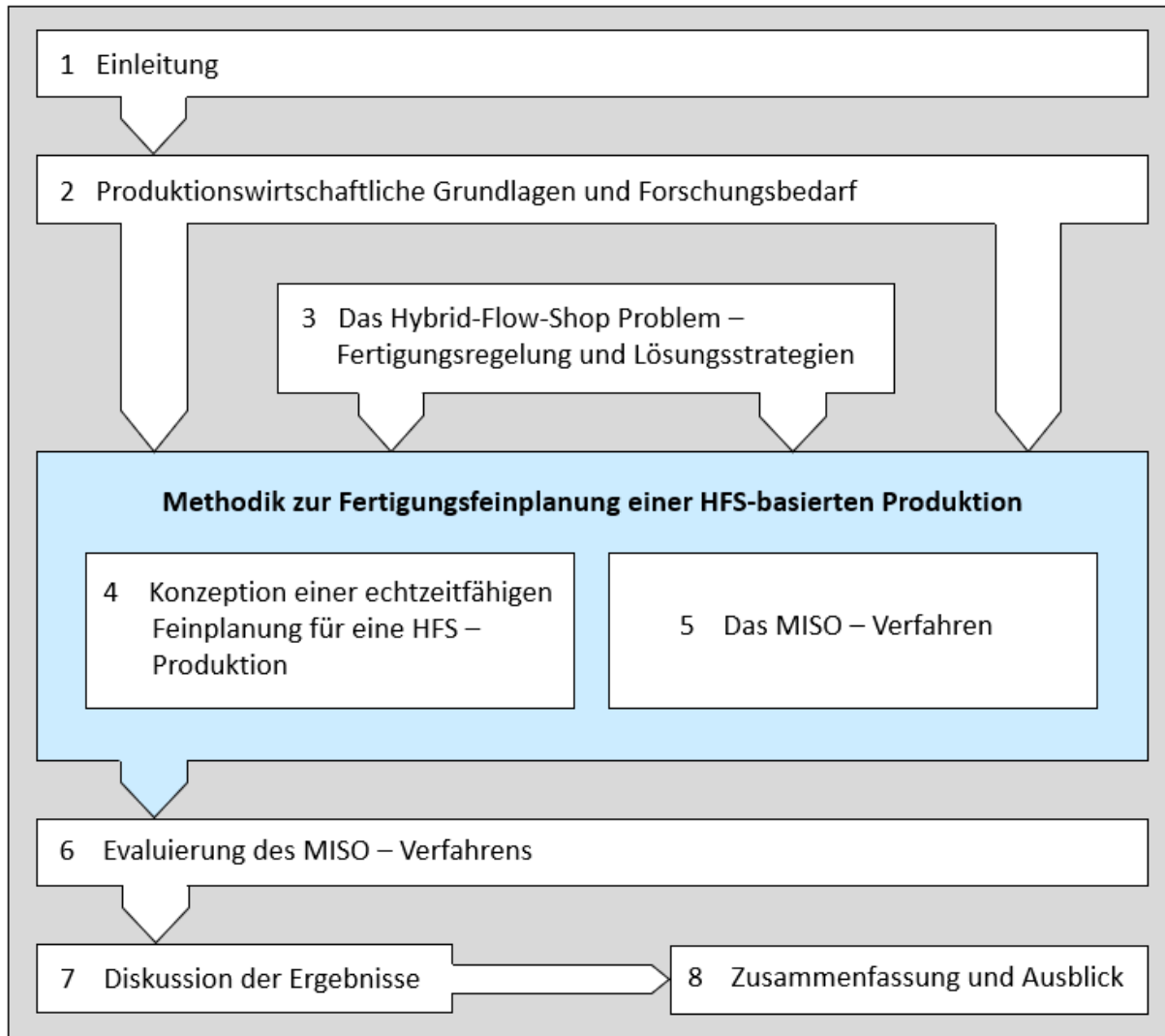


Abbildung 1.7: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

## 2 Produktionswirtschaftliche Grundlagen und Forschungsbedarf

Einführend in die vorliegende Thematik erfolgt in Abschnitt 2.1 eine Definition grundlegender Begrifflichkeiten. Anschließend werden die Aufgaben der Produktionsplanung- und -steuerung vor dem Hintergrund dynamischer Einflüsse beschrieben. Es schließen sich Erläuterungen hinsichtlich einer Strukturierungsmöglichkeit der Fertigung (Abschnitt 2.3), dem Zielsystem der Produktionslogistik sowie einer der vorliegenden Problemstellung zugrunde liegenden Komplexität an. Abschnitt 2.7 beinhaltet die produktionsspezifischen Besonderheiten bei der Fertigung elektronischer Baugruppen ein. Eine detaillierte Anforderungsanalyse zukünftiger Feinplanungssysteme, die auch den derzeitigen Ist-Stand beleuchtet, schließt das Kapitel 2 ab.

### 2.1 Grundlegende Begriffe

#### *Produktion und Produktionssystem*

Die Produktion als Mittelpunkt der betrieblichen Wertschöpfung kann definiert werden als ein Transformationsprozess, bei dem aus natürlichen Ressourcen unter Verwendung von Wissen in Fabriken höherwertige Produkte erzeugt werden [Westkämper & Löffler 2016, S. 2]. Bloech sieht die Produktion als „...den gelenkten Einsatz von Gütern und Dienstleistungen (Produktionsfaktoren) zum Abbau von Rohstoffen bzw. zur Herstellung und Fertigung von Gütern sowie zur Erzeugung von Dienstleistungen“ [Bloech et al. 2014, S. 3], vgl. auch Abbildung 2.1. Das Erzeugen von materiellen Existenzmitteln für die Menschen sowie die gesellschaftlichen Verhältnisse, worin die Menschen produzieren, gibt Dangelmaier unter dem Begriff der Produktion an [Dangelmaier 2017, S. 64]. Ferner führt er aus, dass die Produktion ein vor sich gehender, die materiellen Existenzbedingungen und ihre gegenseitigen Verhältnisse produzierender und reproduzierender Prozess ist.

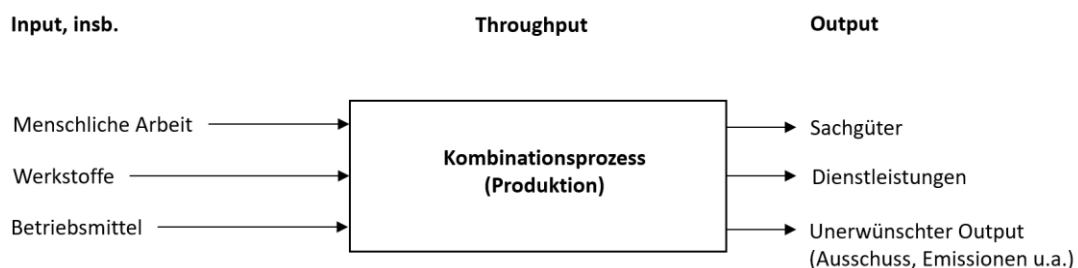


Abbildung 2.1: Produktion als Kombinationsprozess [Blohm et al. 2016, S. 16 f.]

Eine Produktionsorganisation als allgemeines System<sup>11</sup> wird als ein „soziotechnisches System verstanden, welches Input (z. B. Material, Finanzmittel, Energie, Know-how, Methoden) in

<sup>11</sup>Ein System wird definiert als abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehungen stehen, vgl. Schenk & Wirth [2004, S. 78]; Lucke [2006, S. 35]; VDI-3633 [2008, Blatt 1].



wertschöpfenden (z. B. Fertigung oder Montage) und verknüpften Prozessen (z. B. Transport) zu Output (z. B. Produkte, Kosten, Reststoffe) transformiert“ [Bergmann 2013, S. 9 f.]. Ein Produktionssystem<sup>12</sup> verfolgt daher die Absicht der Erstellung von Produkten [Eversheim 1996, S. 1534 ff.], wobei benötigte Prozesse durch technische Ressourcen und Menschen erzeugt werden [Nyhuis 2008, S. 20].

### *Planung und Unternehmensplanung*

Unter Planung wird „ein systematisch-methodischer Prozess der Erkenntnis und Lösung von Zukunftsproblemen“ [Wild 1980, S. 13] verstanden, wobei die Merkmale Zukunftsbezogenheit, Rationalität und Gestaltungscharakter als Beschreibung dienen.

Eßig und Wagner sehen in der Planung u. a. die grundlegende Vorbereitung, die es erst ermöglicht, Entscheidungen zu fällen [Eßig & Wagner 2003, S. 279 f.]. Wiendahl versteht unter Planung „das gedankliche Durchdringen eines zukünftigen Geschehens mit dem Ziel, diejenigen Entscheidungen vorzubereiten und zu treffen, die zur Erreichung des gewünschten Zustandes notwendig sind.“ [Wiendahl 2010, S. 15]. Lugner wiederum gliedert die Planung in die Teilaufgaben Zielbestimmung, Maßnahmenermittlung, Maßnahmenentscheidung sowie Illustration der Maßnahmen [Lugner 1987; zit. n. Schmigalla 1995, S. 69]. Die zum Einsatz kommenden Planungsinstrumente können Theorien<sup>13</sup>, Modelle, Methoden und Verfahren sowie Werkzeuge und Instrumentarien sein [Schenk et al. 2014, S. 219 ff.].

Bezogen auf Produktionsbetriebe kann der Begriff der Planung als die konkrete Festlegung zukünftiger Ziele und zur Generierung von Handlungsalternativen verstanden werden, die zur optimalen Erreichung der Unternehmensziele dienen [Hentze et al. 1993, S. 129 ff.].

Unternehmensplanung ist somit eine „systematische Vorbereitung der Zukunftsgestaltung der Unternehmung“ [Häusler 1969, S. 35 f.]. Unternehmerische Absichten einer Planung können Komplexitätsreduktion, Flexibilisierungserhöhung, Zielorientierung oder Risikoerkennung und -reduktion sein [Hahn 1996, S. 43].

## **2.2 Beschreibung und Strukturierung von Fertigungsstätten**

Eine Fertigungsstätte oder Fabrik ist „ein komplexes System, das sich ständig geplant und ungeplant verändert“ [Westkämper & Zahn 2009, S. 25], und kann anhand verschiedener Ordnungskriterien näher beschrieben bzw. klassifiziert werden [Wiendahl & Harms 2001]. Trotz dieser Möglichkeit einer Clusterung bleibt jede Fabrik divergent in Bezug auf Struktur, Dimension, Gestaltung oder Funktionalität [Schenk et al. 2014, S. 51]. Abbildung 2.2 zeigt eine Auswahl bestimmter Merkmale (Ordnungskriterien) und Möglichkeiten ihrer Ausprägung. Zusätzlich erfolgt eine Beschreibung der Fabrikart, welche u. a. zur Herstellung von elektronischen Baugruppen ihren Einsatz findet.

---

<sup>12</sup> Schenk et al. [2014, S. 219] verweist auf die theoretischen Grundlagen der Planung von Produktionssystemen und nennt dafür z. B. die allgemeine Systemtheorie, vgl. Ropohl [2009], die Graphentheorie, vgl. Ahuja et al. [1993], die Warteschlangentheorie, vgl. Domschke & Drexl [2002] oder die Komplexitäts- und Agilitätstheorie, vgl. Schuh & Wiendahl [1997].

<sup>13</sup> Theorien dienen der Bereitstellung von Begriffen und Argumentationen, um damit eine Systematisierung von Problemstellungen durchzuführen und diese ferner zu erklären, vgl. Patzelt W. J. [1992, S. 86 ff.].

Merkmalsausprägung	Merkmal					
Produkt	Stückgut	Fließgut	Schüttgut			
Haupttechnik	Fertigungstechnik	Verfahrenstechnik	Kombinierte Technik			
Unternehmensgröße	Kleinunternehmen	kleines und mittelständisches Unternehmen	Großunternehmen			
Erzeugnisgröße	Micro	Klein	Mittel	Groß		
Investitionszeitraum	Kurzfristig	Mittelfristig	Langfristig			
Standortstrategie	Lokal	Regional	National	Global		
Standortveränderungen	Mobil	Fest	Kombiniert			
Fabrikorientierung	Prozess	Produkt	Arbeitskräfte		Technik	
Fertigungsart	Einzelfertigung	Kleinserie	Mittelserie	Großserie		
Wertschöpfungsstufen	Marketing	Forschung/Entwicklung	Beschaffung	Produktion	Vertrieb	Service
Betreibermodelle	Kaufen	Mieten	Leasen			
Produktionsstufen	Einzelteil	Bauelemente, Komponenten	Baugruppe, Systembaugruppe	Geräte	Anlagensysteme	
Mechanisierung/Automatisierung	Manuelle Fabrik	Mechanische Fabrik	Automatisierte Fabrik			
Fabrikrealität	Modellierte Fabrik	Virtuelle Fabrik	Digitale Fabrik	Reale Fabrik		

Abbildung 2.2: Klassifizierung einer Auswahl von Fabrikarten, in Anlehnung an [Schenk et al. 2014, S. 51] am Beispiel eines mittelständischen EMS-Dienstleisters

Neben einer Einteilung in unterschiedliche Fabrikarten können die darin stattfindenden Produktionsprozesse durch die räumliche und zeitliche Anordnung der Betriebsmittel beschrieben werden [Schenk et al. 2014, S. 371]. Wiendahl unterteilt dazu die unterschiedlichen Einflussgrößen innerhalb eines Unternehmens in *Markt-/Kundenausrichtung*, *Personalstruktur*, *Technologie* und *wirtschaftliche Einflussgrößen* [Wiendahl 2010, S. 27 f.]. Vier wesentliche Ablaufarten können abgeleitet werden, vgl. Abbildung 2.3.

Die *Werkstattfertigung* ist gekennzeichnet durch Arbeitsplätze, die nach den Bearbeitungsverfahren zu Organisationseinheiten angeordnet sind. Die daraus resultierende Abfolge der Organisationseinheiten im Leistungsprozess ist Erzeugnis spezifisch [Dangelmaier 2001, S. 315]. Eine hohe Elastizität und Anpassungsfähigkeit bezüglich wechselnder Anforderungen des Produktionsprozesses stehen einem hohen Transportaufwand sowie einer mangelnden Übersicht des Fertigungsprozesses gegenüber [Schenk et al. 2014, S. 372]. Kerngebiet der Werkstattfertigung ist die Herstellung von Einzelteilen bzw. kleineren Serien.

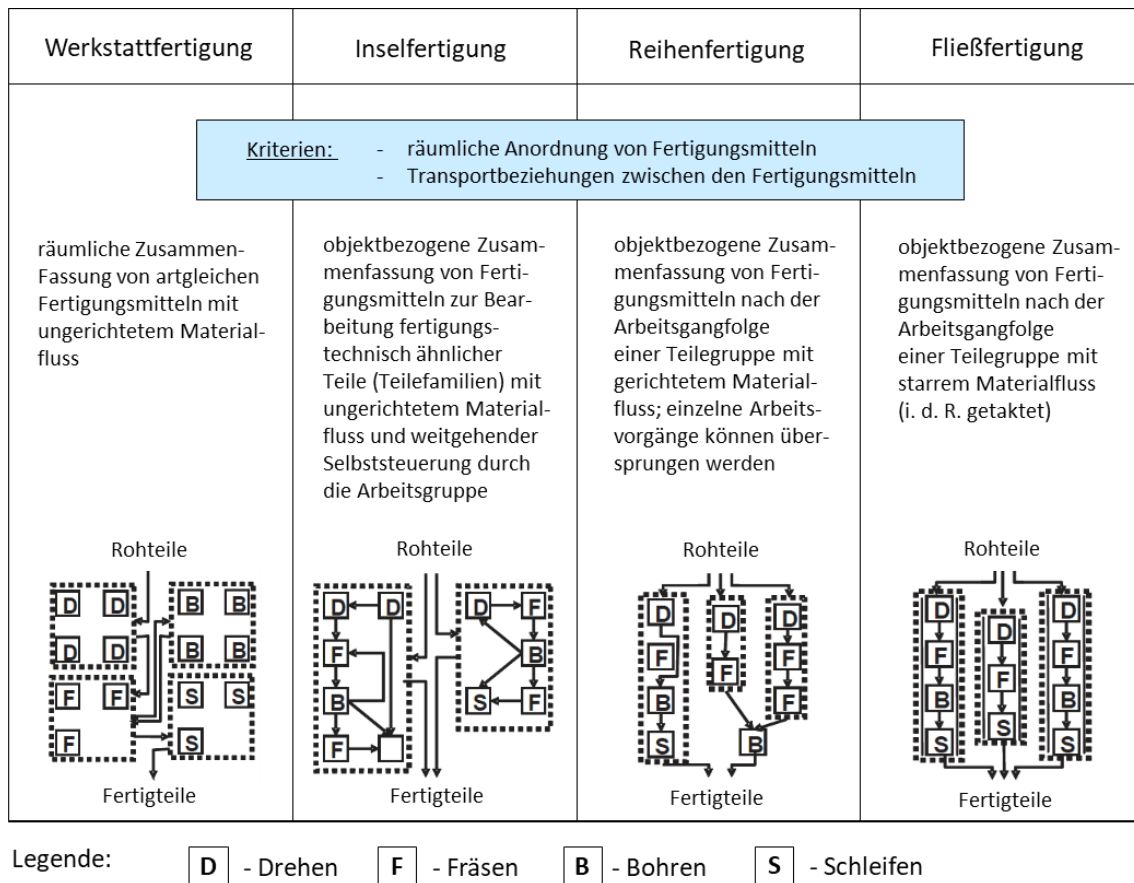


Abbildung 2.3: Merkmal der Betriebstypologie – Ablaufart in der Teilefertigung  
 [Schenk et al. 2014, S. 371]

Kennzeichnend für die *Fließfertigung* ist eine Anordnung der Fertigung nach den Arbeitserfordernissen der Erzeugnisse (Erzeugnis- oder Fließprinzip). Kurze Durchlaufzeiten werden durch den sofortigen Weitertransport der Materialien nach einer Bearbeitungsoperation erreicht [Wiendahl 2010, S. 32]. Nachteilig kann sich dagegen auswirken, dass eine gleichmäßige Auslastung aller Stationen oft nicht erreicht wird. Eine starre Verkettung der Anlagen führt außerdem zu einem Flexibilitätsverlust sowie zu einem Anstieg der Störanfälligkeit [Schenk et al. 2014, S. 372].

Durch eingebrachte Pufferstrecken zwischen den Anlagen<sup>14</sup> wird versucht, kleinere Störungen einzelner Anlagen auszugleichen. Fließfertigungen kommen bei großen Produktionsstückzahlen sowie langen Produktlaufzeiten zum Einsatz.

Setzt sich eine mehrstufige, ortsveränderliche Fertigung aus Bearbeitungs-, Transport-, Handhabungs- und Lagersystemen zusammen, so entsteht eine *flexible Fließfertigung* [Nebl 2011, S. 399]. Das Überspringen einzelner Bearbeitungsstationen wird durch die Kombination von Außen- und Innenverkettung ermöglicht, es existiert kein Taktzwang. Die flexible Fließfertigung ordnet sich ein in eine Fülle von flexiblen Fertigungssystemen als ein generelles Konzept „zur automatischen, ungetakteten, richtungsfreien und damit hochflexiblen Fertigung einer definierten Gruppe ähnlicher Teile“ [Wiendahl 2010, S. 36], wobei ein automatisierter Werkstück- und Informationsfluss eine Grundvoraussetzung ist.

<sup>14</sup> man spricht auch von loser oder elastischer Verkettung

Die Ablaufart der Fertigung des in dieser Arbeit betrachteten EMS-Dienstleisters ist gekennzeichnet durch einen gerichteten Materialfluss, der keinem Taktzwang unterliegt. Außerdem besteht die Möglichkeit, einzelne Fertigungsstufen zu überspringen und somit individuelle Produkte zu fertigen. Diese Art der Produktion wird als *Reihenfertigung* bezeichnet, bei der die Zusammenfassung der Fertigungsmittel mit Bezug auf die Arbeitsvorgangsfolge der Teilegruppe erfolgt [Schenk et al. 2014, S. 372].

### 2.3 Produkttypologie

Die Verknüpfung von Merkmalen der Fabriktypologie (u. a. der Ablaufart, vgl. Abschnitt 2.2) mit Ausprägungen der Produkttypologie ermöglicht eine genaue Beschreibung von Kunden-Lieferanten-Ketten in Bezug auf deren Typ und Eigenschaften [Seelmann-Eggebert & Wahl 2001]. Dabei verbindet die Charakterisierung der Produkte die unterschiedlichen Fabriktypologien miteinander, eine durchgehende Netzwerkstruktur lässt sich somit ableiten [Schenk & Wirth 2004, S. 45].

Merkmal	Merkmalsausprägung				
	Operativ	Taktisch	Strategisch		
<b>Entscheidungs-horizont</b>					
<b>Vertrags-bindung</b>	Klassische Kunden-Lieferanten-Beziehung	Rahmenvertrag	Kooperationsverträge	Fusion	
<b>Informations-plattform</b>	Einheitliches Management System (monolithisch)	Einheitliches Managementsystem mit Ressourcenplanung (ERP- System)	Einheitliches Managementsystem mit unterschiedlichen ERP-Systemen	Unterschiedliche Managementsysteme mit unterschiedlichen ERP-systemen	
<b>Netzwerk-struktur</b>	Vertikal	Diagonal	Sternförmig	Horizontal	
<b>Integrations-stufen</b>	Informationszentren (Sichtrechte auf Info)	Zentrales Auftragsmanagementzentrum (ZAM)	ZAM + Einlastung der Aufträge auf budgetierte Kapazitäten	Zentrale Produktionsplan-optimierung über die gesamte SC	Zentrale Fertigungs-optimierung
<b>Planung und Steuerung</b>	Sukzessiv	Echtzeit	Lokal simultan	Global simultan	
<b>Erzeugnis-struktur</b>	Einteilig	Mehrteilig mit einfacher Struktur	Mehrteilig mit komplexer Struktur		
<b>Produkt-variante</b>	Standardprodukt	Standardprodukt mit Variante	Kundenindividualisiertes Produkt		
<b>Produktart</b>	Einzelprodukt	Kleinserienprodukt	Serienprodukt	Massenprodukt	
<b>Kundennähe</b>	Direkt ab Werk (Werksverkauf)	Eine Zwischenstufe (e-commerce mit Logistikdienstleister)	Zwei Zwischenstufen (mit Einzelhandel)	Mehrere Zwischenstufen (mit Großhandel)	

Abbildung 2.4: Darstellung der Produkttypologie [Schenk & Wojanowski 2000] am Beispiel eines mittelständischen EMS-Dienstleisters

Anhand der unterschiedlichen Merkmalsausprägungen können Rückschlüsse in Bezug auf Vergleichbarkeit verschiedener Unternehmen und Branchen getroffen werden. Das in der vorliegenden Arbeit betrachtete Unternehmen der EMS-Branche agiert demnach (ähnlich vieler Unternehmen anderer Branchen) mit Rahmen- und Kooperationsverträgen, sowie einer klassischen Kunden-Lieferanten-Beziehung. Dabei wird ein einheitliches Managementsystem (SAP R3) eingesetzt,

welches einen Großteil der relevanten Prozesse im Unternehmen abbildet. Die Kunden erhalten (eigens entwickelte) individuelle Produkte, welche in kleinen, mittleren sowie Massenserien produziert und ohne die Nutzung von Zwischenstufen geliefert werden. Planung und Steuerung erfolgen dabei vornehmlich sukzessiv (und teilweise simultan), was zu großen Herausforderungen im gegebenen dynamischen Umfeld führt (vgl. Abbildung 2.4).

## 2.4 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

Systeme für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) nehmen schon seit geraumer Zeit die zentrale Stellung bei der Auftragsabwicklung in der produzierenden Industrie ein [Schuh & Stich 2012b, S. 3]. Dabei gehört Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zu den wesentlichen und inhaltlich anspruchsvollsten Aufgaben eines Industrieunternehmens [Gienke et al. 2007, S. 17]. Allgemein kann sie als Planungs- und Steuerungsinstrument der Produktion und Beschaffung verstanden werden. Ihre Aufgabe ist es, das laufende Produktionsprogramm in regelmäßigen Abständen nach Art und Menge für mehrere Planungsperioden im Voraus zu planen und unter Beachtung gegebener oder zu planender Kapazitäten, trotz unvermeidlicher Störungen wie Personalausfall, Lieferverzögerungen oder Ausschuss, möglichst gut zu realisieren [Wiendahl 2010, S. 249 ff.], [Brankamp 1973, S. 2 f.], [Hackstein 1989, S. 17 ff.], [Dangelmaier & Warnecke 1997, S. 3 ff.], [Wiendahl 1997, S. 12 ff.], [Luczak & Eversheim 1999, S. 29].

Eine breit akzeptierte Definition der Produktionsplanung und -steuerung liefert erstmals Hackstein 1984, der die PPS „als die Planung und Steuerung der gesamten Produktion, also sowohl der indirekten Bereiche wie der Konstruktion, als auch der direkten Bereiche wie der Teilefertigung und Montage“ definiert [Hackstein 1984; Schenk et al. 2014, S. 391]. Diese Sichtweise wird von Luczak und Eversheim erweitert, sie fügen die gesamte technische Auftragsabwicklung (von Angebotsbearbeitung bis Versand) hinzu [Luczak & Eversheim 1999; Schenk et al. 2014, S. 391].

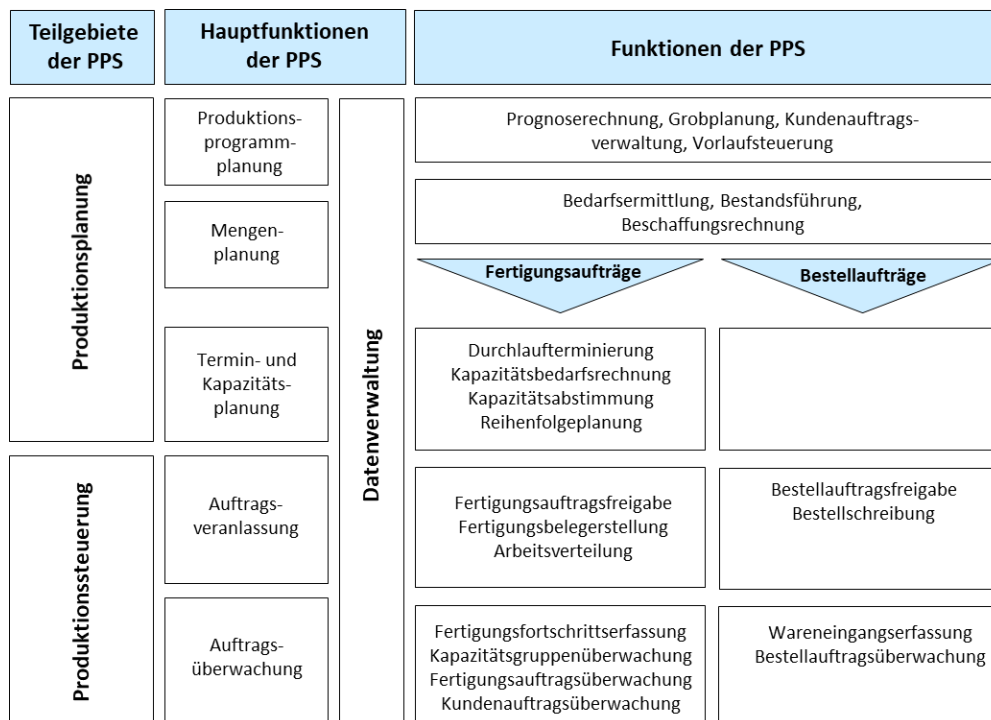


Abbildung 2.5: Einteilung der Produktionsplanung und -steuerung [Hackstein 1984, S. 9]

Gemäß Abbildung 2.5 lässt sich die klassische PPS in die Teilgebiete Produktionsplanung und Produktionssteuerung gliedern, die wiederum in die Hauptfunktionen Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung, Auftragsveranlassung sowie Auftragsüberwachung zu unterteilen sind. Zeitlich kann eine Einteilung in strategisch, taktisch und operativ [Hahn 1996, S. 26], bzw. in lang-, mittel- und kurzfristig erfolgen [Zäpfel 1996, S. 63].

Eine zunehmende Kundenorientierung in den Bereichen Logistik und PPS stellt die typische sukzessive Aufgabenverteilung seit Beginn der neunziger Jahre in Frage. Ziel des Forschungsinstituts für Rationalisierung an der RWTH Aachen war es, eine stärker vernetzte Struktur durch neu definierte Kern- und Querschnittsaufgaben zu erzeugen, um möglichst schnell und flexibel auf Kundenwünsche reagieren zu können [Wiendahl 1996, Kapitel 14]. So definiert das Aachener PPS-Modell die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung sowie die Planung und Steuerung von Fremdbezug und Eigenfertigung als Kernaufgaben der PPS, während Auftragskoordination, Lagerwesen und PPS-Controlling zu den Querschnittsaufgaben zu zählen sind [Lödding 2016, S. 188], vgl. Abbildung 2.6.

Durch Einbeziehung von Netzwerkaufgaben wird versucht, der standortübergreifenden Produktionsplanung innerhalb eines Unternehmens gerecht zu werden und somit einen zentralen Planungsansatz bezüglich der Abstimmung innerhalb einer Supply Chain zu gewährleisten [Schuh 2007, S. 195 ff.].

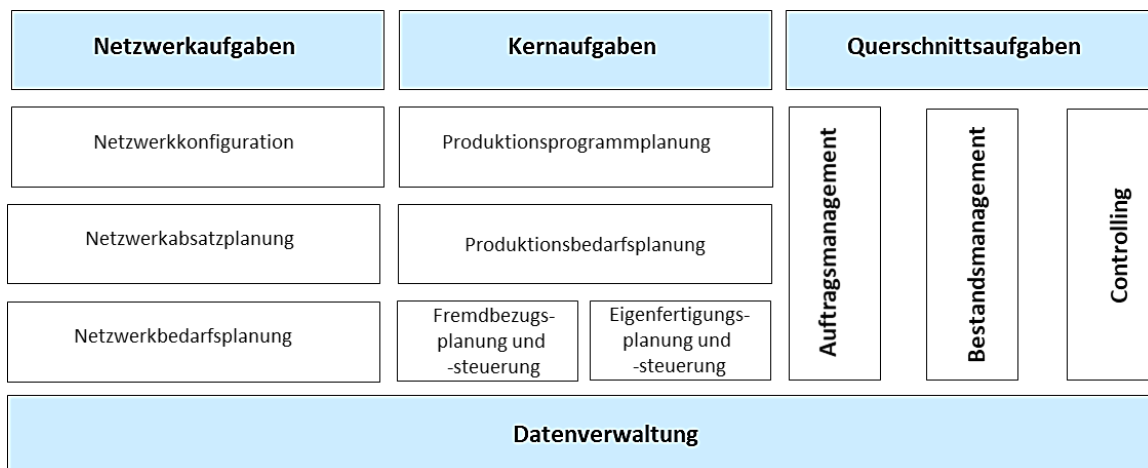


Abbildung 2.6: Das Aachener PPS-Modell als aggregiertes Prozessmodell [Schuh 2007, S. 21]

Alle definierten (Teil-)Aufgaben sind auf eine genaue Datenverwaltung angewiesen [Luczak & Eversheim 1999, S. 9 ff.]. Während die Produktionsprogrammplanung für die langfristige Planung verantwortlich ist, befasst sich die Produktionsbedarfsplanung mit der mittelfristigen Planung. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Eigenfertigungsplanung und -steuerung, welche der kurzfristigen, operativen Planung zugeordnet werden kann.

Die *Produktionsprogrammplanung* überprüft den auf Basis von vorliegenden und prognostizierten Aufträgen erstellten Absatzplan auf Durchführbarkeit. Anschließend erfolgt eine Ressourcengrobplanung, bei der die vorhandenen und prognostizierten Lagerbestände abgeglichen werden. Kapazitätsüber- und -unterdeckungen werden mit Hilfe der Grobplanung auf Basis von Erzeugnis-Stückzahlen aufgezeigt [Schuh 2007, S. 28 ff.]. Die Produktionsprogrammplanung erfolgt rollierend und

periodisch, oft in monatlichen Abständen, wobei die Planungsperioden dabei gegenüber der letzten Planung jeweils um eine Periode in die Zukunft fortgeschrieben werden [Schuh & Stich 2012a, S. 39].

Auf Basis des Produktionsprogramms besteht die Aufgabe der *Produktionsbedarfsplanung* darin, eine mittelfristige Planung der benötigten Ressourcen durchzuführen und somit die Realisierbarkeit mit Hilfe von Beschaffungsprogrammen sicherzustellen. Dabei werden alle in den betrieblichen Produktionsprozess einfließenden Ressourcen wie Betriebsmittel, Material, Personal, etc. betrachtet [Schuh & Stich 2012a, S. 44]. Da zum Zeitpunkt der Planung das Kapazitätsangebot zum zukünftigen Produktionstermin nur grob bekannt ist, kann an dieser Stelle auch nur eine ungefähre Abstimmung geschehen [Schuh 2007, S. 28 ff.]. Die Produktionsbedarfsplanung erzeugt das Beschaffungsprogramm, welches sich in die Teile Eigenfertigungs- sowie Fremdbezugsprogramm gliedert. Aufgaben der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* sind Bestellrechnung, Angebotseinholung/-bewertung, Lieferantenauswahl und Bestellfreigabe [Luczak & Eversheim 1999, S. 9 ff.; Schuh & Stich 2012a, S. 58]. Die Entscheidung, ob ein Produkt fremdvergeben oder eigenständig produziert wird, hat große Auswirkungen auf den Unternehmenserfolg. Eine Fokussierung auf Kernkompetenzen verringert zunehmend in größeren Unternehmen die Fertigungstiefe, bestimmte Fertigungsprozesse werden nach einer Make-or-Buy Entscheidung an Lieferanten ausgelagert. Losgrößenrechnung, Feinterminierung und Reihenfolgeplanung sowie Verfügbarkeitsprüfung gehören zu den Aufgaben der *Eigenfertigungsplanung* [Lödding 2016, S. 115]. Dabei werden die Vorgaben der Produktionsbedarfsplanung innerhalb des Dispositionszeitraumes berücksichtigt. Das Auftreten von ungeplanten Ereignissen erzwingt eine regelmäßige Anpassung der durchgeführten Planung. Die dafür bereitgestellten Informationen der Produktionssteuerung fließen dabei in die Eigenfertigungsplanung zurück und werden bei den zyklischen Planungsläufen mitberücksichtigt [Schuh 2007, S. 28 ff.]. Die Kernaufgabe der Fertigungssteuerung besteht darin, die Vorgaben der Produktionsplanung auch bei häufig unvermeidbaren Störungen umzusetzen [Wiendahl 1997, S. 12]. Lödding entwickelt dazu ein Fertigungssteuerungsmodell (Abbildung 2.7), welches eine Verknüpfung der Funktionen und Zielgrößen sowie deren Stell- und Regelgrößen weitestgehend abbildet.

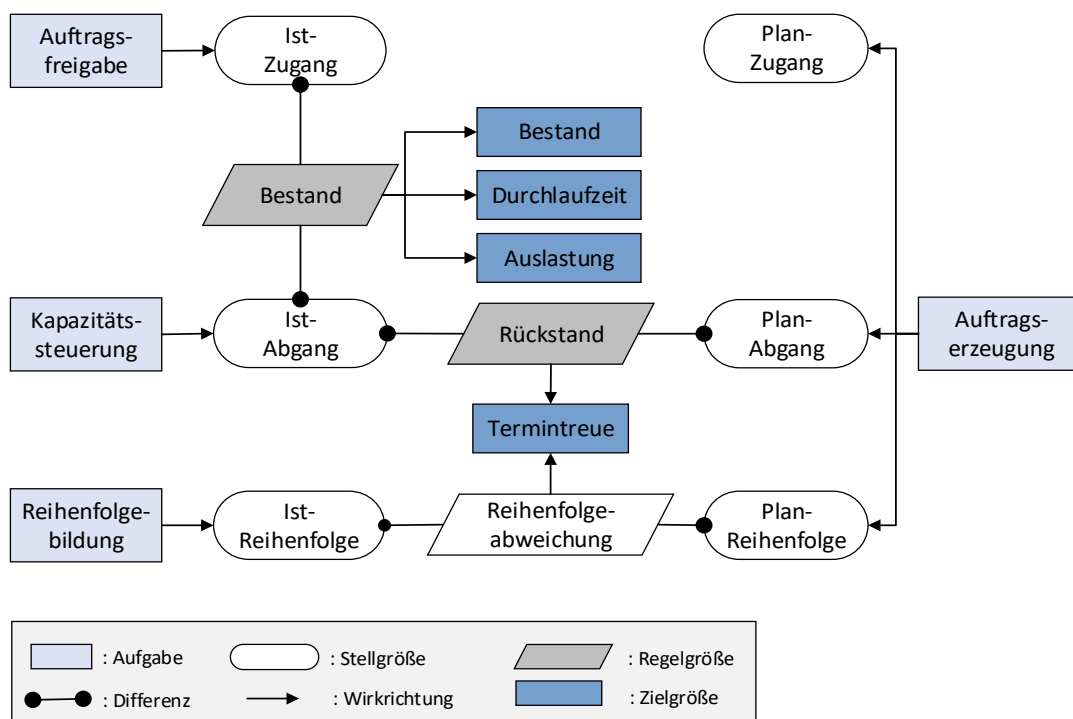


Abbildung 2.7: Modell der Produktionssteuerung [Lödding 2016, S. 8]

Die Auftragserzeugung bildet den Ausgangspunkt der Betrachtung. Grundsätzlich werden drei Funktions- und Aufgabenbereiche unterschieden: Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung. Die Stellgrößen Zugang, Abgang und Reihenfolge werden durch die Aufgaben geregelt. Die Differenz der Plan- und Istwerte der Stellgrößen (Abweichung zweier Stellgrößen, vgl. [Lödding 2016, S. 9]) ergeben die Regelgrößen Bestand, Rückstand sowie Reihenfolgeabweichung. Diese Regelgrößen beeinflussen die Zielgrößen der Produktionslogistik. Mit Hilfe des Modells lassen sich Rückschlüsse auf die Fertigungssteuerung, etwa eine Analyse mangelnder Zielerreichung oder die Unterscheidung zwischen Planung und Steuerung ziehen [Lödding & Wiendahl 2005, S. 10]. Um eine gute Übersichtlichkeit zu gewährleisten, sind nicht alle Wirkzusammenhänge und Aufgaben vollumfänglich dargestellt. Anzumerken ist, dass gerade bei komplexen, mehrstufigen Produktionssystemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten eine Abhängigkeit zwischen Leistung und Reihenfolge der Aufträge besteht, die oft aufgrund der Komplexität des Produktionssystems nicht eindeutig quantifizier- und überschaubar ist.

## 2.5 Zielsystem der Produktionslogistik

Der in der Literatur häufig beschriebene Zielkonflikt [Wiendahl 2010, S. 253] zwischen den Interessen des Kunden auf der einen, sowie den sich davon unterscheidenden Belangen des Unternehmens auf der anderen Seite erzeugt ein Spannungsfeld, welches den Rahmen dieser Arbeit vorgibt, vgl. Abbildung 2.8.

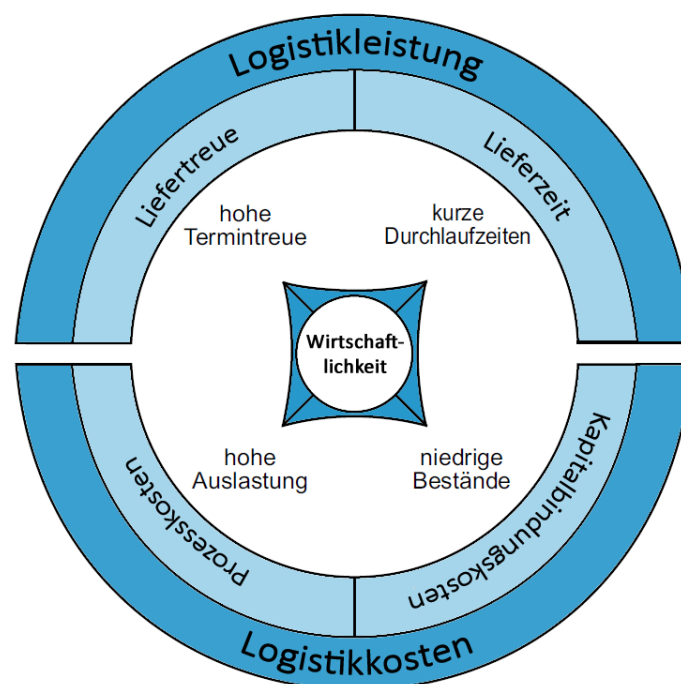


Abbildung 2.8: Zielsystem der Produktionslogistik [Wiendahl 2010, S. 252]

Kundenseitig stehen kurze Liefer- und somit Durchlaufzeiten, sowie eine hohe Termintreue im Fokus, während das Unternehmen eine hohe Auslastung sowie niedrige Bestände anstrebt, um möglichst kostengünstig und profitabel produzieren zu können.



Die schon länger beobachtete Verschiebung der Marktanforderungen an Unternehmen lassen die Logistikleistung mehr und mehr in den Vordergrund treten (vgl. Abschnitt 1.1). Eine Studie des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer) verweist mit Hilfe einer Korrelationsanalyse bei 258 Mitgliedsunternehmen auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen erreichter Umsatzrendite (EBIT) und erreichter Termintreue [Schuh & Schmidt 2007, S. 272 ff.]. Demnach steigert eine Erhöhung der Termintreue von kleiner 70% auf größer 90% die Umsatzrendite um +52%. Außerdem können verspätete Lieferungen ggf. hohe Folgekosten bei den Kunden verursachen, etwa durch Auslastungsverluste, Produktionsstillstände oder Pönale-Forderungen<sup>15</sup> (auch durch die Kunden der Kunden). Ziel eines Unternehmens muss es demnach sein, möglichst kurze und flexible Lieferzeiten auf Produkte zu realisieren und dabei eine hohe Termintreue zu erzielen. Dabei gilt, je kürzer die benötigte Durchlaufzeit eines herzustellenden Produktes ist, desto schneller und flexibler kann das Unternehmen auf sich ändernde Kundenanforderungen (z. B. Bedarfserhöhungen, Bedarfssenkungen oder Eilaufträge) reagieren.

Die Wirkzusammenhänge verdeutlicht Abbildung 2.9. Mit Hilfe der logistischen Kennlinien lässt sich zu jedem Betriebspunkt eine Aussage bezüglich des Erfüllungsgrads der einzelnen logistischen Zielgrößen treffen. Dabei steht jeder Betriebspunkt für eine andere Kombination von Zielerfüllungsgraden der Zielgrößen. Eine Veränderung zugunsten einer Zielgröße hat die Veränderung aller anderen Zielgrößen zur Folge. Die gegenläufigen Zielsetzungen der Produktionslogistik [Gutenberg 1971, S. 147 ff.] lassen eine einfache Optimierung, folglich eine Maximierung oder Minimierung eines Teilzieles (wie z. B. die Verbesserung der Termintreue) nicht zu, ohne andere Zielgrößen negativ zu beeinflussen [Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 4].

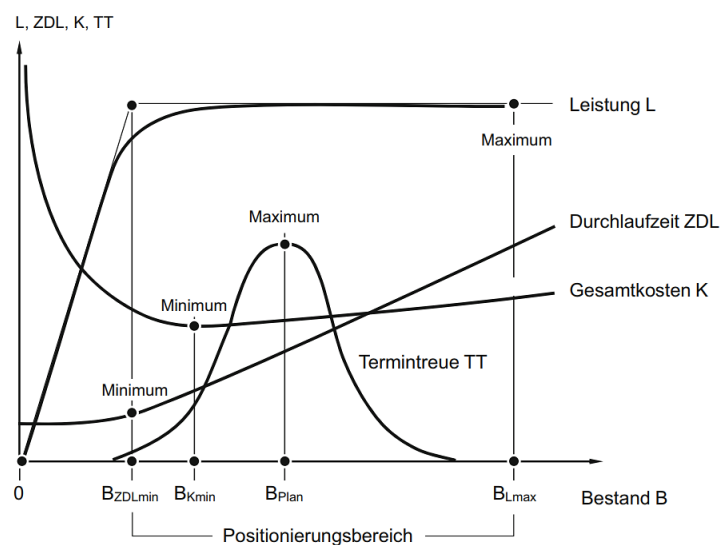


Abbildung 2.9: Verlauf von Leistung, Durchlaufzeit und Kosten eines Arbeitsplatzes abhängig vom Bestand [Nyhuis und Wiendahl 2012, S. 178]

Die Freigabe der Produktionsaufträge hat beträchtlichen Einfluss auf den umlaufenden Bestand im Produktionssystem. Dieser WIP (**W**ork **I**n **P**rocess) ist eine wichtige produktionslogistische Regelgröße. Seine Höhe beeinflusst die Zielgrößen Auslastung, Durchlaufzeit sowie Bestand. Niedriger

<sup>15</sup> vgl. JF [2019]: „Die (...) Pönale (engl. Penalty) definiert sich als Vertragsstrafe oder auch Konventionalstrafe wegen Nicht- oder Schlechterfüllung oder Unterlassungen von vertraglichen Verbindlichkeiten des Schuldners hinsichtlich Lieferungen, Leistungen oder Erbauungen und wird als Geldstrafe ausgestaltet.“

Umlaufbestand hat zur Folge, dass auch die Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge minimal ist, da Liege- und Wartezeiten vermieden bzw. reduziert werden. Zeitgleich sinken jedoch Auslastung und Leistung des Produktionssystems, da es zu ungeplanten Stillständen durch fehlendes Material kommt [Gottmann 2016, S. 54 ff.]. Die Höhe des WIP, der eine maximale Auslastung bei minimaler Durchlaufzeit ermöglicht, wird auch idealer Mindestbestand genannt [Nyhuis & Wiendahl 2003, S. 63 ff.].

## 2.6 Komplexitätsbetrachtung

Komplexität<sup>16</sup> beschreibt „die Eigenschaft eines Systems, determiniert durch die Anzahl und die Art der Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen eines Systems“ [Luhmann 1980, S. 1064 ff.]. Die Produktionssteuerung stellt eine komplexe, organisatorische Aufgabe im Rahmen des Auftragsabwicklungsprozesses dar [Lödding & Wiendahl 2005, S. 2 ff.]. Operative Eingriffe in komplexe Systeme sind oft gekennzeichnet durch Unklarheit der Ursache-Wirkung-Zusammenhänge, des Zeitverhaltens sowie unterschiedlicher kurz- und langfristiger als auch lokaler und globaler Wirkungen [Ripp 2011, S. 33]. Komplexitätstreiber, die für Abweichungen der Planung verantwortlich sind, werden in interne und externe Gründe unterschieden. Hierzu gehören u. a. Maschinenstörungen oder -ausfälle, Ausschuss, Mitarbeiterausfall durch Krankheit, geänderte Kundenwunschtermine oder verspätete Materiallieferungen der Lieferanten [Zäh et al. 2010, S. 300 ff.]. Die Komplexität der Reihenfolgeplanung wird zusätzlich beeinflusst durch die logistischen Zielkriterien sowie durch die Organisationsform eines Unternehmens.

Der Aufwand, der bei der Berechnung von Algorithmen entsteht, wird in die Klassen P und NP eingeteilt [Klemmt 2012, S. 46; Pinedo 2016, S. 599]. Ausschlaggebend dabei ist, wie schnell der Lösungsaufwand mit steigender Problemgröße wächst [Zimmermann 2008, S. 271].

Zur Klasse P werden alle zu lösenden Probleme gezählt, bei denen der Rechenaufwand proportional zur Problemgröße steigt. Für diese Problemgrößen stehen in der Praxis viele Verfahren bereit, um diese exakt und in einer angemessenen Zeit lösen zu können (man spricht von „effizienter Lösbarkeit“). Durch den von Johnson bereits im Jahr 1954 vorgestellten Algorithmus lässt sich beispielsweise das oft untersuchte Optimierungsproblem [F2 | | Z] (zweistufiger Flow Shop mit Zielkriterium Zykluszeit) mit einem Rechenaufwand von  $O(n \log n)$  optimal lösen [Johnson 1954, S. 61 ff.]. Steigt der Rechenaufwand im Verhältnis zur Problemgröße exponentiell, sodass kein von der Problemgröße abhängiges Polynom existiert, liegt ein nichtdeterministisch in polynominaler Zeit lösbares Problem NP vor. Kennzeichnend für diese Problemgröße ist, dass bisher kein Algorithmus zur Lösung bekannt ist, der auch die schwierigste Instanz mit polynominalem Aufwand löst [Domschke et al. 2015, S. 133]. Nahezu alle praxisorientierten Problemstellungen der Fertigungsfeinplanung werden der Klasse NP zugeordnet (und werden somit als „schwierige“ oder „schwer lösbare“ Probleme bezeichnet). Wird daher das Optimierungsproblem des erwähnten zweistufigen Flow Shops nur durch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten der einzelnen Aufträge erweitert, so steigert sich die Komplexität zu NP-Schwer [Schocke 2000, S. 29]<sup>17</sup>. Allgemein führen Scheduling-Probleme, die in der Regel durch

<sup>16</sup> vgl. auch Kersten et al. [2005, S.1 ff.], der unter Komplexität die Vielfalt von Objekten, Strukturen und Prozessen versteht; Sussmann [2000, S. 5] erweitert den Komplexitätsbegriff in Bezug auf Systeme: „A system is complex when it composed of a group of related units (subsystems), for which the degree and nature of the relationships is imperfectly known. Its overall emergent behavior is difficult to predict, even when subsystem behavior is readily predictable. [...] Behavior in the long-term and short-term may be markedly different and small changes in inputs or parameters may produce large changes in behavior.“

<sup>17</sup>Schocke führt weiter an, „dass jede Erweiterung eines zweistufigen Hybrid-Flow-Shop Problems ebenfalls NP-schwer ist.“ Schocke [2000, S. 29]. Dabei bezieht sich auf die von Gupta [1988, S. 441] und Hoogeveen et al. [1996, S. 174 f.] angeführten Beweise, dass die zweistufigen Hybrid-Flow-Shop Probleme mit den Konfigurationen [HF2 (1, IP2) | | Z], [HF2 (IP2,1) | | Z] und [HF2 (IP2, IP2) | | Z] NP-schwer sind.

ganzahlige bzw. gemischt-ganzzahlige Modelle dargestellt werden, in der Praxis schon bei wenigen Maschinen und Aufträgen zu einer kombinatorischen Explosion. Selbst mit aktuellster IT-Unterstützung sind sie nicht in vertretbarer Zeit zu enumerieren [Suhl & Mellouli 2013, S. 9].

Die steigende Problemkomplexität veranschaulichen Hopp und Spearman, die Untersuchungen bezüglich erforderlicher Rechenzeit in Abhängigkeit zur Problemgröße durchführen [Hopp & Spearman 2011; Heger 2014, S. 26]. Demnach würden die betrachteten Computersysteme bei einem Ein-Maschinen-Problem schon bei 20 Aufträgen ca. 77 Jahre benötigen, um die optimale Lösung des Problems ausfindig zu machen<sup>18</sup>. Tabelle 1.1 verdeutlicht das exponentielle Wachstum bei steigender Maschinen- (M) und Auftragsanzahl (N).

Tabelle 1.1: Kombinatorische Explosion von Scheduling-Problemen in Anlehnung an [Aufenanger 2009, S. 13]

<b>(N, M)</b>	<b>Anzahl möglicher Reihenfolgen</b>
(2,2)	4
(2,3)	8
(2,5)	32
(2,10)	1.024
(5,5)	$2,48832 * 10^{10}$
(10,5)	$6,292383221979 * 10^{32}$
(10,10)	$3,959408661224 * 10^{65}$
(20,10)	$7,265176487899 * 10^{183}$
(100,50)	$3,163608514963 * 10^{7.898}$
(100,100)	$1,000841883595 * 10^{15.797}$

Die aufgezeigte Komplexität von in der Praxis vornehmlich auftretenden Reihenfolge-Problemen in Kombination mit den eingesetzten Organisationsformen der Fertigung stellt besondere Anforderungen an die Verfahren zur operativen Produktionsfeinplanung. Somit haben die eingesetzten Methoden einen entscheidenden Einfluss auf Erreichung der formulierten Ziele des Unternehmens (vgl. Abschnitt 2.2).

## 2.7 Herstellung elektronischer Baugruppen

Die deutsche Elektronikindustrie gehörte 2018 mit dem Rekordwert von 195 Mrd. € Umsatz, d. h. 11% der deutschen Industrieproduktion und rund 3% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zu einer der führenden Industriebranchen Deutschlands [ZVEI-B 2019]. Mit 890.000 inlandsbeschäftigten Mitarbeitern trägt sie als ein Hauptarbeitgeber der Industrie maßgeblich zum Erfolg der deutschen Wirtschaft bei. Die EMS-Dienstleistung als Teil der Elektroindustrie legt dabei den Schwerpunkt auf die Auftragsfertigung von elektronischen Baugruppen, Geräten und Systemen. Zu den klassischen Basis-Dienstleistungen Entwicklung, Fertigung und After-Sales-Service werden zunehmend weitere, sog.

<sup>18</sup> Hopp & Spearman [2011] gehen auf die benötigte Rechenzeit zweier Computersysteme ein, wobei System A 1.000.000 Sequenzen pro Sekunde vergleichen kann während System B noch 1.000-mal schneller als System A ist. Ein sinnvoller Einsatz zur vollständigen Lösung von komplexen Reihenfolgeplanungsproblemen ist somit in der Praxis nicht im Ansatz gegeben.

Backstage-Dienstleistungen wie Traceability<sup>19</sup>, Produkt-Compliance oder Obsoleszenz-Management<sup>20</sup> von den Kunden verlangt [ZVEI-A 2017]. Die Fertigung elektronischer Baugruppen beinhaltet die Montage verschiedener elektronischer Bauelemente auf einen Verdrahtungsträger zu einer größeren funktionalen Einheit. Der Grundträger wird dabei als Leiterplatte bezeichnet. Die Organisationsform der Fertigung elektronischer Baugruppen entspricht der einer flexiblen Fließfertigung. Dabei ähneln sich viele Produktionsschritte der unterschiedlichen Produkte, häufig werden parallel angeordnete Maschinen für die jeweiligen Fertigungsoperationen eingesetzt.

### *SMT-Bestückung*

Die Oberflächenmontage (engl. Surface Mount Technology, SMT) stellt oft den ersten Fertigungsprozess dar. Hierbei werden elektronische Bauelemente mit dem Verdrahtungsträger unter Verwendung von sog. SMT-Linien miteinander verbunden. Die Leiterplatte wird mittels Lotpastendruckers mit Lotpaste<sup>21</sup> versehen. Nach erfolgreich durchgeführter Kontrolle durch ein SPI-System (Solder Paste Inspection) erfolgt die Bestückung der elektronischen Bauteile, die anschließend im Lötprozess mit der Leiterplatte fest verbunden werden. Die Kontaktierung der Bauelemente mit der Leiterplatte findet dabei über Lotkugeln statt.



Abbildung 2.10: Beispiel einer SMT-Linie, in Anlehnung an [Torenko & Associates 2017]

Neben dem Vorhandensein unterschiedlicher Aufbauformen (einseitig oder doppelseitig zu bestückende Leiterplatten) findet die SMT-Fertigung in einer parallelen Maschinenumgebung statt und kann somit als Teil eines Hybrid-Flow-Shops verstanden werden. Es muss demzufolge die Entscheidung getroffen werden, welche Baugruppe auf welcher SMT-Linie bestückt werden soll.

Jede Bestückung einer Baugruppe bedingt einen Rüstprozess im Vorfeld der SMT-Fertigung. Notwendige elektronische Bauteile werden dazu im ersten Schritt auf Rüstwagen angeordnet und mit der SMT-Linie verbunden. Es ist möglich, mehrere Baugruppen gleichzeitig zu Rüstfamilien

<sup>19</sup> Das Schlagwort „Traceability“, also die Rückverfolgbarkeit im EMS-Bereich, steht für eine lückenlose Dokumentierung von eingesetztem Material, Maschinen und Prozessen - vor, während und nach dem Produktionsprozess. Einige Industriebereiche, wie z. B. die Medizintechnik unterliegen dabei gesetzlichen Normen, die u. a. Anforderungen an die Traceability regeln.

<sup>20</sup> Obsoleszenz ist der Zustand, bei dem ein Gut oder Prozess nicht mehr verfügbar ist, vgl. Bartels & Kuther [2014]. Ursachen können u. a. Alterungsprozesse, Innovationszyklen, technologische Entwicklungen, Marktanpassungen an Kundenbedürfnisse, Restriktionen oder Umweltkatastrophen sein. Ziel des Obsoleszenz Managements ist die Sicherstellung einer Langzeitverfügbarkeit von Produkten mit der geforderten Qualität zu minimierten Kosten.

<sup>21</sup> Lotpaste bezeichnet eine pastöse Mischung aus Lotmetallpulver und Flussmittel zum Löten oberflächenmontierbarer SMD-Bauelemente. Geeignete SMD-Lotpaste besteht zu ca. 90 % aus Kügelchen einer Zinnlegierung und zu ca. 10 Prozent aus Flussmittel, vgl. Klein Wassink et al. [1991, S. 150 ff.].

zusammenzufassen. Im zweiten Schritt wird die SMT-Linie eingerichtet. Dazu muss das spezifische Baugruppenprogramm geladen werden, welches sämtliche Parameter wie Ofentemperatur, Bandgeschwindigkeit oder die Bestückkoordinaten enthält. Der Wechsel auf die richtige Lotpaste und Lotpastenschablone sowie das Bereitstellen des richtigen Leiterplattentyps schließen den Rüstvorgang ab. Die Verarbeitung der Leiterplatte erfolgt als Einzelleiterplatte oder in einem Nutzen<sup>22</sup>. Die Fertigungslosgröße ist variabel und muss vor Beginn des Bestückungsprozesses festgelegt werden. Betrachtet man nur die erste Stufe des Produktionsprozesses, so wird deutlich, wie vielschichtig das vorliegende Optimierungsproblem ist. Drei Arten von Einflussgrößen können den Charakter eines solchen Problems beschreiben, vgl. Abbildung 2.11.

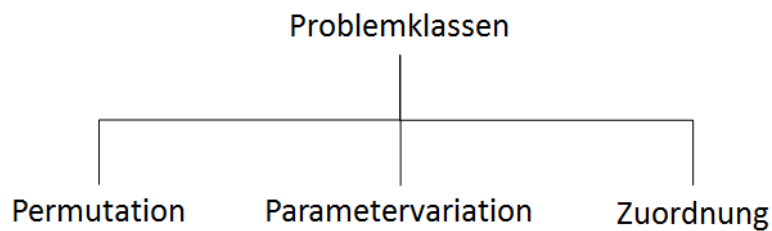


Abbildung 2.11: Problemklassen eines Optimierungsproblems [März et al. 2011, S. 30]

Durch die festzulegende Zuordnung der Aufträge zu den Maschinen sowie durch die Bildung der bestmöglichen Reihenfolge auf den parallelen Maschinen liegt ein NP-hartes Problem vor, welches mit der Anzahl der potenziell zu tauschenden Aufträge exponentiell wächst (vgl. Abschnitt 2.6). „Das Vorhandensein von Zuordnungs- oder Permutationsvariablen ist generell ein starkes Indiz für die Notwendigkeit simulationsgestützter Optimierungsverfahren.“ [März et al. 2011, S. 30].

#### *Automatische optische Inspektion (AOI)*

Die optische Kontrolle (eng. automated optical inspection) als erster Prüfschritt nach der Bestückung (teilweise vor und nach dem Reflow-Lötprozess<sup>23</sup>) wird von Systemen übernommen, die mit Hilfe hochauflösender Bildverarbeitungsverfahren potenzielle Fehler wie Fehlbestückungen, fehlende Bauteile, schlechte Lötverbindungen oder Grabsteineffekte<sup>24</sup> identifizieren können. Mehr als 72% aller AOI-Systeme werden weltweit nach der Bestückung zur Kontrolle der Bestückqualität von Leiterplatten eingesetzt [EPP 2017]. Dazu führt das System einen Vergleich von vorab gespeicherten SOLL-Bildern mit den zu überprüfenden IST-Aufnahmen der Baugruppen durch. Die anhaltende Miniaturisierung der Bauelemente sowie die steigende Komplexität und Dichte der Bauteile auf den Baugruppen machen eine stetige Weiterentwicklung der AOI-Systeme notwendig.

AOI-Systeme können inline und offline in den Produktionsprozess eingebunden sein. Einige EMS-Dienstleister sehen den AOI-Prozess als Teil der SMT-Bestückung und erweitern die Linien

<sup>22</sup> Als **Nutzen** wird in der elektrischen Verbindungstechnik ein Verbund von Leiterplatten bezeichnet, die nicht vereinzelt, sondern fest miteinander verbunden sind. Nutzen durchlaufen den SMT-Prozess zusammenhängend, um einen verbesserten Bestückungsprozess darstellen zu können. Identische Schaltungsfunktionen mit gleichem Aufbau oder verschiedene Schaltungsfunktionen je Nutzen sind möglich. Ein Fertigungsnutzen umfasst mindestens zwei Einzelleiterplatten, vgl. CAD-UL [2019a].

<sup>23</sup> Während des Reflow-Lötprozesses (als Standardverfahren zum Löten in der SMT-Fertigung) werden mit Hilfe der Zuführung von Wärmeenergie (in einem genau definierten Temperatur-Zeit-Profil) die SMD-Bauteile fest mit der Rohleiterplatte verbunden, vgl. Bell [2005, S. 82 ff.]; KE [2019].

<sup>24</sup> Der **Grabsteineffekt** (engl. auch *Tombstone Effect* oder *Tombstoning*) oder *Aufrichteffekt* ist ein häufiger Fehler beim Löten von SMD-Bauteilen. Während des Lötprozesses stellen sich dabei Bauelemente einseitig auf, wobei eine der zwei Seiten nicht elektrisch kontaktiert wird. Das Bauteil ist damit nicht funktionsfähig, vgl. Klein Wassink et al. [1991, S. 610]; Bell [2005, S. 155].

entsprechend um diese Prüfung. In diesem Fall erfolgt die Kontrolle als Teil des SMT-Prozesses. Da oftmals die Bestückung der Leiterplatten schneller als die anschließende AOI-Prüfung realisiert wird, ist die Geschwindigkeit der SMT-Linie herabzusetzen, um einen Taktausgleich zu erzielen. Damit wird die Effektivität der SMT-Linie verringert. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass Fertigungsschritte der SMT-Bestückung und AOI-Kontrolle getrennt und nacheinander stattfinden, damit taktbedingte Verluste vermieden werden. Die automatische optische Inspektion als zweite Stufe des Produktionsprozesses findet in einer parallelen Maschinenumgebung und unter der Annahme statt, dass jede Baugruppe auf jedem Gerät prüfbar ist. Oft zeigt sich hingegen in der Praxis, dass bestimmte Typen von Baugruppen von bestimmten Geräten überprüft werden sollten, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen<sup>25</sup>. Vor jeder Prüfung erfolgt das Einrichten des Prüfgerätes. Diese Zeit kann, je Baugruppe und Gerät, als konstant benötigte Rüstzeit angesehen werden. Es liegt ein zu optimierendes Zuordnungs- (Aufträge zu Prüfgeräten) sowie Permutationsproblem (Bildung der besten Auftragsreihenfolge je Gerät) vor, welches oft manuell und lokal und mit Hilfe von einfachen Prioritätsregeln gelöst wird.

### *Bestückung von bedrahteten Bauelementen*

Eine besondere Art der Leiterplattenbestückung bildet die THT-Fertigung (Through-Hole-Technology). Vornehmlich größere Komponenten, aber auch Bauelemente mit starker mechanischer Belastung oder einer hohen Stromtragfähigkeitsanforderung werden mit Hilfe der THT-Bestückung der Leiterplatte zugeführt. Dazu besitzen die einzelnen Bauteile Drahtanschlüsse, die durch die vorhandenen Kontaktlöcher der Leiterplatte gesteckt und anschließend während des Lötprozesses fest mit der Leiterplatte verbunden werden [TC 2019].

### *Wellenlötung*

Im Anschluss an die manuelle Durchsteckmontage einzelner Bauteile erfolgt eine automatisierte Lötung. Dabei werden die Prozessschritte Flussmittelauftrag, Vorheizen der zu lötenen Leiterplatte, Lötvorgang sowie Kühlung durchlaufen. Während des Lötvorgangs wird die Leiterplattenunterseite über eine Lötwellen (auch als Löt-Schwall bezeichnet) geführt, die die Lötstellen benetzt und somit ausbildet. Nachteil der Wellenlötung sind die notwendigen manuellen Tätigkeiten. Die (nach dem SMT-Prozess) erneute Temperaturerhöhung auf kurzzeitig  $> 260^{\circ}\text{C}$  (Löttemperatur von bleifreien Lotpasten, jedoch abhängig von vielen weiteren Parametern) stresst viele Bauteile zusätzlich, zudem sind bestimmte Bestückkonstellationen gerade bei beidseitigen Leiterplatten nicht möglich. Bereits während der Entwicklung muss daher auf eine realisierbare und effiziente Möglichkeit der Herstellung geachtet werden.

### *Selektiv-Lötung*

Die Anforderung nach immer kleineren Baugruppen hat zur Folge, dass sich die beidseitig bestückte Leiterplatte bei vielen Produkten als Standard durchgesetzt hat. Bei beidseitig SMD-bestückten Leiterplatten ist das Wellenlöten für bedrahtete (THT)-Bauteile nicht immer möglich. Die in der Vergangenheit daraus resultierende manuelle Handlötung ist aufgrund vieler Nachteile und Prozessunsicherheiten als nicht mehr zeitgemäß einzustufen. Das maschinelle Selektiv-Löten hat den Handprozess weitestgehend abgelöst. Die zu lötenen Bauelemente werden manuell bestückt und mit

---

<sup>25</sup> Trotz identischer Funktions- und Leistungsmerkmale und auch bei baugleichen, identischen Prüfgeräten machen kleine unterschiedliche Parameter und Toleranzen, die praktisch nicht genau oder nur sehr aufwändig erfasst werden können, einen relevanten Unterschied aus. Auch der Ort der Ausführung hat durch seine Eigenschaften einen Einfluss auf die Arbeitsweise der Geräte.

Hilfe eines Baugruppenträgers dem Selektiv-Lötautomaten zugeführt. Das entsprechende Lötprogramm muss vorab geladen werden. Danach kommt es zu den automatisierten Prozessschritten Flussmittelauftrag (dem sog. Fluxen), Vorheizen und Löten der Bauelemente. Löttemperatur und Kontaktzeit können dabei exakt eingestellt werden. Eine Vorwärmung der Lötstelle in der Selektivlötanlage erfolgt unter Zugabe eines Stickstoff-Gasstroms (zur Vermeidung einer Oxidation). Aufgrund der Automatisierung ist eine Reproduzierbarkeit der Lötresultate gegeben. Ähnlich dem AOI-Prozess findet auch das Selektiv- und Wellenlöten mit einzelnen oder parallel arbeitenden Maschinen statt. Nicht alle Baugruppen durchlaufen dabei diesen Prozess und müssen bei der Bildung einer bestmöglichen Reihenfolge beachtet werden. Bei einem Einsatz von unterschiedlichen Lötanlagen ist die entsprechende Zuordnung von Baugruppen teilweise technisch vorgegeben und hebt daher den Charakter der parallelen Umgebung auf. Informationen dazu sind in den Arbeitsplänen hinterlegt und müssen bei der Zuordnung mitberücksichtigt werden. Rüstaufwände und Zeiten für manuelle Tätigkeiten sind vornehmlich abhängig von der Anzahl der zu lötenden Bauelemente bzw. Lötstellen.

### *Beschichtung der bestückten Leiterplatte*

In vielen Bereichen der Wirtschaft kommen Leiterplatten zum Einsatz, die mit Hilfe einer (teilweise partiellen) Lackierung vor äußeren Einflüssen geschützt werden müssen. Durch das sog. Coating erhöht sich zusätzlich die Kriechstrom-, Spannungs- und Vibrationsfestigkeit [CAD-UL 2019b], Feuchtigkeit und Verschmutzung auf der Leiterplatte können stark verringert werden.

Das Lackieren erfolgt mit Hilfe von vollautomatisierten Lackieranlagen, wobei unterschiedliche Baugruppen mitunter auch verschiedene Lacke benötigen. Der noch vereinzelt stattfindende Prozess der manuellen Handlackierung wird im weiteren Verlauf nicht betrachtet, da er oft parallel während der automatischen Lackierung stattfindet und keinen Engpass darstellt. Lackieranlagen werden in einer parallelen Maschinenumgebung eingesetzt und bilden oft den letzten (automatisierten) Fertigungsschritt vor den finalen Prüf- und Montageprozessen. Herausfordernd für die Planung sind die aufwändigen, zeitintensiven Rüstvorgänge bei einem Wechsel der Lacke. Die Reihenfolgebildung der Aufträge ist somit von entscheidender Bedeutung für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der investitionsintensiven Maschinen.

### *Prüfung elektronischer Baugruppen*

Neben den bereits beschriebenen Fertigungsprozessen bei der Herstellung elektronischer Baugruppen sind weitere Prozesse notwendig, die oft kundenindividuell festgelegt werden. Genannt werden an dieser Stelle weitere Prüfverfahren (neben dem AOI), die zur Sicherstellung der Qualität mitunter durchgeführt werden. Zur Auswahl zählen:

- Sichtprüfung
- Röntgeninspektion
- In Circuit Test (ICT)
- Flying Probe Test
- Boundary Scan Test
- Elektrischer Funktionstest (FKT)
- Hochspannungstest (HV)

Die stetig steigende Individualisierung von Kunden und Produkten löst eine kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung der notwendigen Fertigungsprozesse aus. Deshalb kann an dieser Stelle kein

Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Prinzipiell finden auch die Prüfprozesse in einem parallelen Maschinenumfeld statt, wobei aufgrund von Adapterinvestitionen und Kapazitätsbetrachtungen teilweise nur ein Prüfgerät pro Leiterplattentyp vorhanden ist. Das Umstellen (Rüsten) auf einen anderen Leiterplattentyp ist von vielen Faktoren abhängig und muss zur Schaffung der notwendigen Transparenz individuell erfasst werden.

### *Vereinzelung der Leiterplatten*

Die Trennung der bestückten Leiterplatten (die sog. Nutzentrennung) erfolgt, je nach Arbeitsplanvorgabe der Baugruppen, in der Fertigung zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Dazu können folgende Verfahren eingesetzt werden:

- mechanische Verfahren der Trennung
  - manuell
  - Rollenmesser
  - Stanzeinrichtung
  - Beißschneidverfahren
  - Keilmesser
- sägende/ fräsende Trennung
- Lasernutzentrennung

Ähnlich zu den Prüfungen existieren auch bei den Trennprozessen parallele Strukturen in der Fertigung. Die jeweilige Rüst- und Vorbereitungszeit zum Trennen ist in der Regel klein und somit bei vielen Baugruppen zu vernachlässigen.

### *Weitere Fertigungsschritte*

Viele Elektronikfertiger sehen sich als Fullservice-Dienstleister und bieten den Kunden weitere Leistungen an. Dazu zählen kundenindividuelle Montagen oder (kundenspezifische) Beschriftungen der Produkte. Durch die Konzentration vieler Kunden auf ihre Kernkompetenzen kommt es teilweise zur Verlagerung (Outsourcing) von ganzen Fertigungsbereichen hin zu den EMS-Dienstleistern. Damit wird das Aufgabenspektrum der Lieferanten deutlich erhöht. Teilweise erfolgt anschließend ein Versenden der fertigen Produkte direkt an den Endkunden (in Absprache mit dem Auftraggeber). Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese Prozesse, die u. a. auch das Verpacken und Versenden einschließen, nicht mitberücksichtigt.

### *Zusammenfassung*

Die Elektronikindustrie, insbesondere die Herstellung elektronischer Baugruppen ist gekennzeichnet durch eine intensive Kundenbindung. Zunehmend entwickelt sich ihre logistische Kompetenz zu einem entscheidenden Faktor. Kunden wünschen individuelle Produkte, vermehrte Varianten und zusätzliche Serviceleistungen bei hoher Lieferfähigkeit und kurzen Produktionsdurchlaufzeiten. Demzufolge entstehen auch kurze Lieferzeiten zum Kunden. Kurzfristige Änderungen sollen flexibel und ohne Verletzung der Termintreue durchgeführt werden [Krog 2006; Mößmer et al. 2007, S. 3 ff.; Schuberthan & Potrafke 2007, S. 8 ff.].

Die flexible Fließfertigung hat sich als Organisationsform der Fertigung von elektronischen Baugruppen durchgesetzt. Parallel angeordnete Maschinen auf den unterschiedlichen Stufen der Produktion



erhöhen zusätzlich die Komplexität der Fertigungssteuerung, eine Hybrid-Flow-Shop Produktion entsteht. Die bestmögliche Zuordnung von Aufträgen zu den einzelnen Maschinen sowie die anschließende Reihenfolgebildung trägt entscheidend dazu bei, notwendige Unternehmensziele zu erreichen. Die in dieser Branche üblichen kurzfristigen Änderungswünsche der Kunden erzeugen häufige Produktionsplanänderungen. Unterstützende Feinplanungssysteme werden aufgrund ihrer Eigenschaften besonders im akuten Störfall häufig nur rudimentär eingesetzt. Die Verantwortung und Entscheidung liegt damit ausschließlich beim Planer, der ohne Systemunterstützung überfordert ist. Oft liegt das Bestreben (nur noch) darin, einen ausführbaren Plan zu gewährleisten. Bei investitionsintensiven Maschinen (etwa SMT-Linien oder Beschichtungsanlagen), die Baugruppen mit hohen Rüstzeiten bearbeiten, führt dies (neben der Verschlechterung der Termintreue zum Kunden) zu erheblichen Effektivitätsverlusten in der Produktion.

## 2.8 Anforderungsanalyse zukünftiger Feinplanungssysteme

### 2.8.1 Feinplanungssysteme in der heutigen Fertigungssteuerung

Die Fertigungsfeinplanung als Teil der Fertigungssteuerung der Ebene 3 bildet die Schnittstelle zwischen Planungsebene 4 und den Maschinenebenen 2, 1 und 0, vgl. Abbildung 2.12. Der aktive Eingriff in die Fertigungsplanung bzw. die Änderung der erzeugten Fertigungspläne sind der Ebene 3 vorbehalten [VDI-5600 2007]. Derzeit im Einsatz befindliche Feinplanungssysteme werden als Aufrufsysteme verstanden und angewendet. Sie dienen der Unterstützung bei der Entscheidungsfindung durch den Fertigungsplaner. Der Mensch steht im Mittelpunkt und ist Ausgangspunkt aller zukünftigen Planungen und Entscheidungen [Fransoo et al. 2011, S. 315]. Viele Feinplanungssysteme bieten dem Benutzer verschiedenste Möglichkeiten einer graphischen Aufbereitung der Daten. Aufgrund der oft vorliegenden hohen Komplexität der Fertigung ist ein gesamtheitlicher Überblick jedoch nicht möglich. Ständig neu vorliegende Informationen aus der Fertigung bzw. anderer Unternehmensbereiche (z. B. Arbeitsvorbereitung, Disposition oder Order Fulfillment) erfordern kontinuierlich (mindestens) eine Überprüfung des aktuellen Fertigungsplans. Dies ist durch den Planer auch mit Hilfe aktueller Feinplanungssysteme nicht darstellbar.

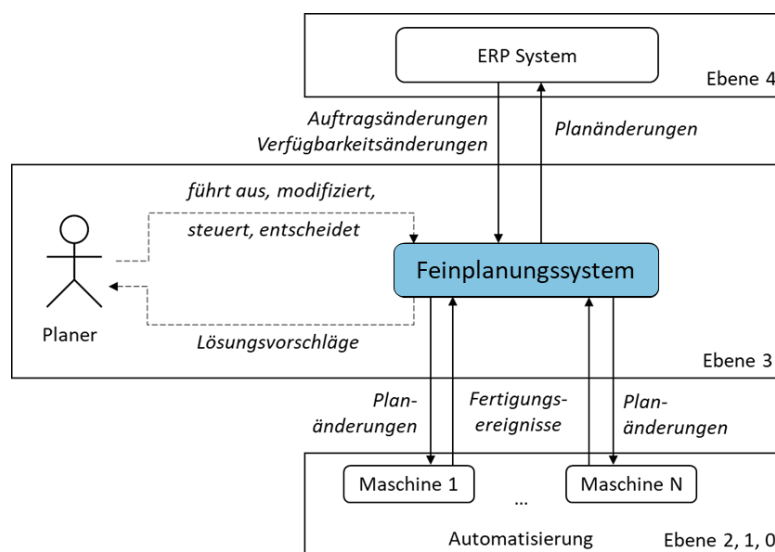


Abbildung 2.12: Einordnung der Fertigungssteuerung nach dem ISA-95 Standard, in Anlehnung an [ANSI/ ISA-95.00.03 2013]

## 2.8.2 Aufgaben bestehender Feinplanungssysteme

In der betrieblichen Praxis kommen Feinplanungssysteme bei verschiedenen Ereignissen zum Einsatz. Grundlegend können 2 Anwendungsfälle definiert werden<sup>26</sup>:

1. Erstellung des Fertigungsplans
2. Aktualisierung/ Anpassung des Fertigungsplans

Die **Erstellung des Fertigungsplans** findet statt, nachdem die übergeordneten Prozesse der Produktionsplanung und -steuerung abgeschlossen wurden. Der Planer wählt ein bestimmtes Feinplanungsverfahren und legt die gewünschten Parameter abhängig von der zu erreichenden Zielsetzung fest [Dimitrov 2015, S. 79]. Anschließend erfolgt die Ausführung des Feinplanungsverfahrens. Die Ergebnisse daraus werden durch den Planer bewertet. Festzustellen ist, dass ein vollumfängliches Verständnis bzw. Durchdringen des Lösungsvorschlags aufgrund der Komplexität des Ausgangsproblems nur schwer bzw. nicht erreicht werden kann.

Ist das Ergebnis aus Sicht des Planers nicht zufriedenstellend, hat er zum einen die Möglichkeit, mit einer veränderten Parametrisierung das Feinplanungsverfahren erneut auszuführen, bzw. durch manuelles Nachjustieren den Fertigungsplan auf seine Bedürfnisse anzupassen.

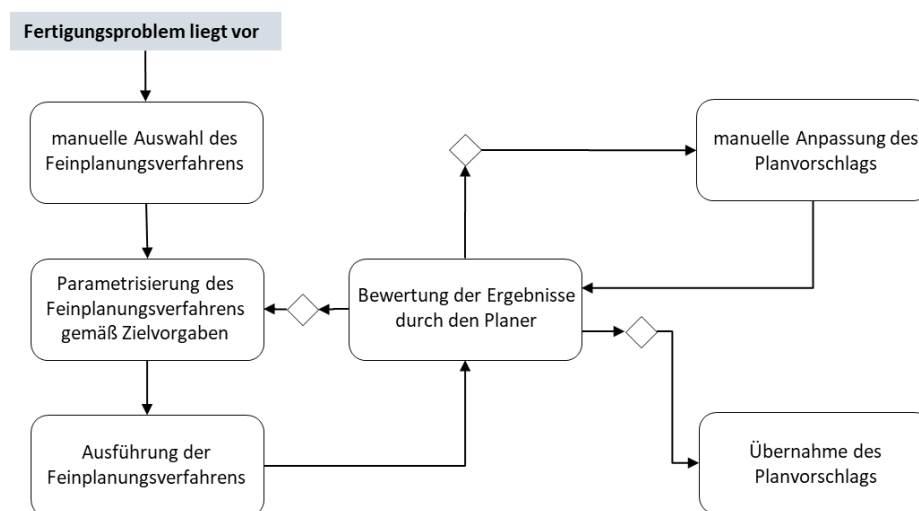


Abbildung 2.13: Erzeugung eines Fertigungsplans durch den Einsatz aktueller Feinplanungssysteme

In Abbildung 2.13 ist die Fokussierung auf den Planer zu erkennen, der (auch mit der beschriebenen Systemunterstützung) nicht alle Wirkzusammenhänge erkennen und dementsprechend die Prozesse richtig steuern kann. Zusätzlich fehlen teilweise notwendige Informationen aus der Fertigung oder liegen nur in nicht verwendbaren Formaten vor.

Qualität und Durchführbarkeit des Fertigungsplans hängen somit entscheidend von der Fertigungserfahrung des Planers sowie von seinen Systemkenntnissen ab. Aktuelle Feinplanungssysteme nutzen einfache Heuristiken zur Lösungsfindung bzw. vereinfachen das Ausgangsproblem stark, um in einer möglichst kurzen Zeit ausführbare Ergebnisse generieren zu können. Erschwerend kommt hinzu, dass mit der Verwendung des Feinplanungssystems als

<sup>26</sup> vgl. dazu auch Dimitrov [2015], der in die 3 Anwendungsfälle H1: Ausführung eines Feinplanungsverfahrens; H2: Durchführung von Benutzerinteraktionen sowie H3: Reaktion auf Störung/ Eilauftrag unterteilt

Aufruffunktion nur 1-2 % der verfügbaren Rechenzeit real genutzt werden kann [Fox & Smith 1984]. Die somit in kurzer Zeit erzeugten Pläne dienen oft nur als Startwert und müssen vom Planer manuell korrigiert bzw. angepasst werden. Durch das Übernehmen eines neu erzeugten oder modifizierten Fertigungsplans in einem bestimmten Fertigungsbereich ergeben sich gegebenenfalls auch Änderungen in anderen Produktionsabschnitten. Eine abteilungsübergreifende Koordinierung der neu ermittelten Planungsergebnisse bzw. eine hierarchisch festgelegte Planungsstruktur ist in aktuellen Systemen nur selten vorgesehen, eine aufwendige Abstimmung zwischen den Planern die Folge. Liegen dem Planer neue Informationen vor, die ein Eingreifen in die aktuelle Planung notwendig erscheinen lassen, kommt es zur **Aktualisierung bzw. Anpassung des Fertigungsplans**. Gründe hierfür sind beispielsweise Änderungen der Maschinenzeiten, Auftragszugänge oder Ressourcenanpassungen. Der Fertigungsplaner hat die Möglichkeit - ohne Unterstützung des Feinplanungssystems, die Veränderungen manuell im System durchzuführen und den neuen, angepassten Fertigungsplan freizugeben. Dieses in der Praxis häufig beobachtete Verfahren hat den großen Nachteil, dass die Veränderung im Fertigungsplan zwar schnell durchgeführt wird, Auswirkungen daraus jedoch nicht zu überschauen sind und somit teilweise qualitativ schlechte oder sogar unzulässige Fertigungspläne generiert werden. Erscheinen die notwendigen Anpassungen jedoch als zu bedeutend, kann anschließend das Feinplanungsverfahren erneut gestartet und damit ein neuer Fertigungsplan erzeugt werden. Erstellte und freigegebene Fertigungspläne sind im Produktionsalltag aufgrund von häufig auftretenden Abweichungen schnell veraltet. Eine umgehende Reaktion auf vorliegende **Störungen** ist notwendig, um einen bestmöglichen Fertigungsablauf sicherzustellen bzw. mindestens einen durchführbaren Fertigungsplan zu gewährleisten. Ist der Fertigungsplaner verfügbar, kann er manuell oder mit Hilfe des Feinplanungssystems die Störung – z. B. ein Maschinenausfall, im neuen Fertigungsplan berücksichtigen. Tritt eine Störung ohne Planer-Verfügbarkeit auf, ist der zuständige Mitarbeiter gezwungen, allein die notwendigen Entscheidungen zu treffen. Der vorgegebene Plan ist damit nicht mehr durchführbar und es kann zu schwerwiegenden Folgeerscheinungen im weiteren Produktionsablauf kommen. Ohne Unterstützung durch den Fertigungsplaner sind besonders Spät- und Nachschichten anfällig für falsche Entscheidungen mit großen wirtschaftlichen Auswirkungen, vgl. Abbildung 2.14.

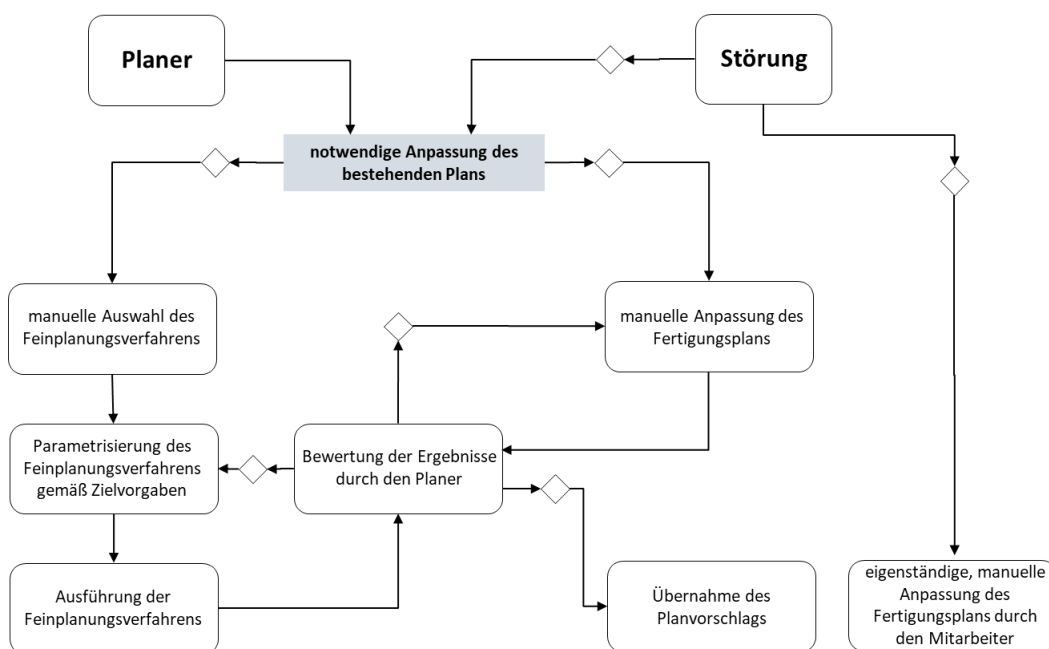


Abbildung 2.14: Aktualisierung/ Anpassung des Fertigungsplans im betrieblichen Ablauf

Besonders im Störfall zeigt sich die Anfälligkeit eingesetzter Feinplanungssysteme [Meystel et al. 2006, S. 206 f.]. Sie sind nicht für ein reaktives Verhalten ausgelegt und können ausschließlich als Hilfsmittel zusammen mit dem Planer eingesetzt werden. Häufig auftretende Veränderungen in der Fertigung bedingen eine kontinuierliche Anpassung bzw. Überprüfung des aktuellen Fertigungsplans. Die derzeit unterstützend eingesetzten Feinplanungssysteme können diese Aufgaben nicht autonom erfüllen. Unter diesen Umständen besteht häufig nur noch das Ziel der Aufrechterhaltung der Produktion durch die Generierung von durchführbaren Plänen ohne Absicht einer verbesserten Qualität.

### *Integration in die Unternehmens-IT*

Ein verbesserter Einsatz von Feinplanungssystemen als Komponente der Fertigungssteuerung kann nur gelingen, wenn diese vollumfänglich mit in die Unternehmens-IT eingebunden werden [Thiel 2011]. Im Umfeld einer zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung der verschiedenen Unternehmensbereiche werden vergangene Defizite gerade in Bezug auf die Informationserhebung und -bereitstellung mehr und mehr überwunden. Die Verfügbarkeit dieser notwendigen Informationen eröffnet auch dem Prozess der kurzfristigen Produktionsfeinplanung neue Möglichkeiten. Es zeigt sich, dass Unternehmen, die ihre Entscheidungen quantitativ auf Daten aufbauen, eine höhere Produktivität besitzen [Brynjolfsson et al. 2011].

Zukünftige Feinplanungssysteme müssen, um den tatsächlichen Zustand der Fertigung abbilden zu können, auf alle relevanten Informationen jederzeit zugreifen können, vgl. [Andelfinger & Hänisch 2017, S. 30]. Die kontinuierliche Anpassung der Plandaten an die Realität schließt die Lücke der Systeme und ist die Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz automatisch verbessernder, teils autonomer Feinplanungssysteme.

### **2.8.3 Anforderungen an zukünftige Feinplanungssysteme**

Veränderungstreiber wie die voranschreitende Digitalisierung realer Prozesse oder die zunehmende Implementierung von cyber-physischen Systemen (CPS) in der Produktion führen zu neuen Herausforderungen zukünftig eingesetzter Planungssysteme. Auch der Kunde mit seinen stetig steigenden Ansprüchen rückt im Bereich der Produktionsfeinplanung mehr und mehr in den Fokus<sup>27</sup>.

### *Handhabung von Unsicherheiten*

Produktionsprozesse sind dynamisch, zum Zeitpunkt der Planerstellung liegen gewöhnlich nicht alle relevanten Informationen vor. In der Literatur sind verschiedene Ansätze zu finden, mit dieser Unsicherheit umzugehen, vgl. [Sauer 2002a, S. 17 ff.; Schneeweiß 2002, S. 104 ff.]. Grundsätzlich erfolgt eine initiale Planerstellung proaktiv oder prädikativ (siehe dazu Abschnitt 3.1). Aktuelle Feinplanungssysteme erzeugen somit einen (den Zielvorgaben möglichst gut entsprechenden) Fertigungsplan, der jedoch aufgrund von eintreffenden Veränderungen im Regelfall schnell veraltet ist. Das reaktive<sup>28</sup> Eingreifen übernimmt derzeit der Planer, der dazu das Feinplanungsverfahren nur teilweise als Hilfsmittel nutzt bzw. nutzen kann (vgl. Abschnitt „Aufgaben bestehender

---

<sup>27</sup> Die heutigen Märkte erfahren zunehmend eine Gewichtsverschiebung von markt- und betriebsbezogenen Zielgrößen. Zunehmend treten marktbezogenen Zielgrößen in den Vordergrund (Wiendahl [2010]). Beispiele dafür sind die Forderung nach ständiger Verbesserung der Termintreue oder die zunehmende Individualisierung der Produkte, die einen direkten Einfluss auf die Fertigungsfeinplanung haben.

<sup>28</sup> Praxisnahe, dynamische Änderungen des Produktionsumfeldes können durch eine **reaktive Planung** berücksichtigt werden. Dabei erfolgt eine Anpassung des nunmehr veralteten Plans auf die neuen Gegebenheiten. Es bestehen zwei Möglichkeiten: (1) eine partielle Änderung oder (2) eine gänzliche Neuerstellung des bestehenden Plans.

Feinplanungssysteme“). Daraus lässt sich ableiten, dass das Potential aktuell eingesetzter Feinplanungssysteme in einem nur sehr geringen Maß genutzt wird. Zukünftig besteht die Anforderung darin, auch den reaktiven Teil der Planung durch die Feinplanungssysteme abzubilden. Fortschrittliche Systeme müssen in der Lage sein, zunächst einen prädikativen Plan zu erstellen, und diesen bei Bedarf reaktiv an veränderte Bedingungen anzupassen. Ein proaktives Verhalten wird in dieser Arbeit nicht präferiert, da nachweislich unnötige Kosten durch die zusätzlich zur Verfügung gehaltenen Ressourcen entstehen können [Aufenanger 2009, S. 18].

### *Robustes Verhalten im dynamischen Umfeld*

Die Produktion befindet sich in „einer turbulenten Umgebung in Bezug auf die Änderungsdynamik der Märkte, Produkte und Technologien“ [Westkämper & Bauernhansl 2014, S. 16]. Das Dilemma der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.5), also eine möglichst hohe Logistik-Leistung bei möglichst geringen Logistik-Kosten, wird u. a. auch durch kurzfristige Änderungen der Kundenaufträge (auch nach bereits erfolgter Auftragsfreigabe) z. B. hinsichtlich der Lieferzeit, Varianten oder Mengen von Erzeugnissen, zusätzlich verstärkt. Die Produktionsplanung und -steuerung muss in der Lage sein, auf diese unvorhersehbaren, nicht planbaren Änderungen zeitnah zu reagieren und ggf. Änderungen im Produktionsablauf ad hoc vorzunehmen. Feinplanungssysteme benötigen daher ein widerstandsfähiges Verhalten gegenüber kurzfristig auftretenden Änderungen, welches sich in einer gleichmäßigen Zielerreichung trotz veränderter äußerer Bedingungen ausdrückt.

### *Informationsverarbeitung*

Datenverfügbarkeit und -qualität sind entscheidend für jeden Planungsprozess. Eine Kernannahme von „Industrie 4.0“<sup>29</sup> besteht darin, dass jegliche Informationen zu jedem Zeitpunkt bereitstehen werden. Der Zugriff auf dezentrale Sensoren<sup>30</sup> in der Fertigung dient dazu, zukünftig alle Informationen in Echtzeit zu bündeln und im „Internet der Dinge“ zu vernetzen. Ausgehend von dieser Basis der Informationsbereitstellung besteht die große Herausforderung, die richtigen Schlüsse aus den vorhandenen, sich ständig ändernden Daten für das Unternehmen zu ziehen. Die quantitative Auswertung von Daten mit Hilfe von Algorithmen und Technologien ist Inhalt des „Data Science“<sup>31</sup>. Neue Steuerungsmethoden müssen diese Datenflut beherrschen und wichtige Informationen daraus extrahieren, um richtige Entscheidungen treffen zu können. Erst das Vorhandensein von notwendigen Informationen zum benötigten Zeitpunkt lässt eine Überlegung zur Automatisierung von Feinplanungssystemen sinnvoll erscheinen.

### *Komplexitätsmanagement*

Schon im Jahr 1956 machte W. R. Ashby darauf aufmerksam, dass eine steigende äußere Marktkomplexität auch zu einem stetigen Anstieg der unternehmensinternen Komplexität führt [Ashby 1956]. Im Verlauf einer zunehmenden Globalisierung verstärkt sich dieser Effekt enorm.

---

<sup>29</sup> Der Begriff der „Industrie 4.0“ bezeichnet „eine Form industrieller Wertschöpfung, die durch Digitalisierung, Automatisierung sowie Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure charakterisiert ist und auf Prozesse, Produkte oder Geschäftsmodelle von Industriebetrieben einwirkt“, Obermaier [2016, S. 31]; Roth [2016, S. 6] sieht „Industrie 4.0“ als „die Vernetzung aller menschlichen und maschinellen Akteure über die komplette Wertschöpfungskette sowie die Digitalisierung und Echtzeitauswertung aller hierfür relevanten Informationen mit dem Ziel, die Prozesse der Wertschöpfung transparenter und effizienter zu gestalten, um mit intelligenten Produkten und Dienstleistungen den Kundennutzen zu optimieren.“

<sup>30</sup> Nach Westkämper & Bauernhansl [2014, S. 19] umfassen Sensoren alle technischen Objekte „in denen elektronische Komponenten enthalten sind, und Informationsspeicher für Daten und IT-Tools, die jederzeit an jedem Ort verfügbar sind.“

<sup>31</sup> STEELE [2019, S. 2] beschreibt die Wissenschaft des „Data Science“ als „an amalgam of analytic methods aimed at extracting information from data“.

So hat sich ein Großteil der Unternehmen von komplizierten zu komplexen Systemen entwickelt [Sargut & McGrath 2011]. Die durch den Kunden vorgegebenen, kurzfristigen und dynamischen Zielbedingungen erzeugen zusätzlich eine immer größere Anzahl von Restriktionen während der Planung und Steuerung.

Wildemann definiert drei Strategien im Umgang mit Komplexität [Wildemann 2014]:

- Komplexitätsvermeidung
- Komplexitätsreduktion
- Komplexitätsbeherrschung

Eine *Komplexitätsvermeidung* lässt sich verwirklichen, indem man ihre Entstehung möglichst präventiv verhindert [Schoeneberg 2014, S. 20]. Beispielsweise sollen Modulbildungen von Produkten, Organisationen und Prozessen langfristig die innerbetriebliche Komplexität begrenzen.

Eine dauerhafte Vermeidung widerspricht jedoch Ashbys Gesetz der erforderlichen Varietät, der notwendigen Anpassung der internen zur externen Komplexität. Unternehmen, die langfristig am Markt erfolgreich sein wollen, sollten ihre Komplexität anderweitig managen.

Die Bildung von Fraktalen soll eine *Komplexitätsreduktion* im Unternehmen unterstützen. Warnecke beschreibt dazu die Struktur einer fraktalen Fabrik [Warnecke 1995], die nach Schenk zur Organisationsform der segmentierten Fabrik zählt [Schenk et al. 2014, S. 56]. Ziel ist es, selbstähnliche, sich selbst organisierende sowie selbstoptimierende Produktionsfraktale zu erzeugen, die miteinander kommunizieren. Zukünftig sollen dezentrale cyber-physische Systeme<sup>32</sup> untereinander interagieren können und damit den nächsten Schritt in Richtung cyber-physisches Produktionssystem<sup>33</sup> (CPPS) bilden. Dabei ist zu beachten, dass eine autarke, dezentrale Optimierung einzelner CPS oft Auswirkungen auf andere Bereiche hat<sup>34</sup>.

Festzustellen ist zudem, dass ein Abbau der inneren Komplexität mit Hilfe von einfachen Systemen zu Marktverlusten, Ineffektivität und Wachstumsstopp führt [Bauernhansl et al. 2014, S. 15].

Die Entwicklung einfacher Feinplanungssysteme führt somit nicht zum Ziel und wird nicht weiterverfolgt. Schlussfolgernd sollten zukünftige Planungssysteme entsprechend konzipiert sein, die vorhandene (und oft nicht vermeidbare) *Komplexität* möglichst gut zu *beherrschen*. Schöneberg beschreibt dazu Möglichkeiten wie die Anpassung organisatorischer Rahmenbedingungen oder den Einsatz von flexibel skalierbaren IT-Systemen [Schoeneberg 2014]. Trotz zukünftiger dezentraler und autonomer Vernetzung (der CPS) müssen die eingesetzten Planungssysteme in der Lage sein, die gesamtheitlichen Auswirkungen einzelner Ereignisse zu bewerten und ggf. daraus ableitend automatisch erzeugte, bestmögliche Plananpassungen zu erzeugen.

### *Beachtung von Benutzerinteraktionen*

Zukünftige Feinplanungssysteme werden ohne den Einsatz eines Planers Fertigungspläne erstellen und entsprechend bei Bedarf automatisch ändern. Trotzdem wird es notwendig sein, den Input des Planers zu berücksichtigen und nicht im anschließenden Optimierungslauf durch das Feinplanungsverfahren

---

<sup>32</sup> Cyber-physische Systeme (CPS) sind eine Kombination von Software- und Hardwaresystemen, die zu einem komplexen und intelligenten Verbund verschmelzen. Dabei besitzt jedes einzelne physische Objekt eine eigene Identität. Ein CPS setzt sich dabei aus den technologischen Ansätzen „Ubiquitous Computing“, „Internet der Dinge und Dienste“ und „Cloud Computing“ zusammen, vgl. Obermaier [2016]; Roth [2016, S. 23]; Reinheimer [2017].

<sup>33</sup> Ein Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS) beschreibt den Verbund einzelner CPS und ist in der Lage, die Produktion dezentral und kontextadaptiv zu steuern. Dazu sind geeignete Schnittstellen notwendig, vgl. Roth [2016, S. 23]; Andelfinger & Hänisch [2017].

<sup>34</sup> Ändert ein CPS aufgrund von Selbstoptimierung beispielsweise die Reihenfolge seiner Auftragsbearbeitung, kann dies zu Verschlechterung bei anderen Einheiten - und somit zur Verschlechterung des Gesamtsystems führen.

zu verändern. Informationen (z. B. über einen geplanten Ausfall einer Maschine oder die Terminierung eines bestimmten Auftrags zu einem Fixtermin), die das System nicht kennt und ausschließlich durch den Planer manuell erfasst werden können, müssen auch zukünftig entsprechend priorisiert werden. In solchen Fällen muss das Feinplanungssystem in der Lage sein, trotz dieser zusätzlichen Restriktionen einen bestmöglichen Fertigungsplan zu generieren.

#### *Kooperation mehrerer Benutzer mit dem Feinplanungssystem*

Größere Unternehmen verfügen oft über komplexe und aufeinander aufbauende Fertigungsbereiche mit mehreren Planungsabteilungen. Unterschiedliche Planer müssen daher in einem Feinplanungssystem interagieren. Dieses Zusammenspiel verschiedener Akteure, definiert als mixed-initiative Interaktion<sup>35</sup>, wird sich zukünftig grundlegend ändern. Die Koordinierung der Absprachen zwischen Mensch und System gilt dabei als größte Herausforderung [Fransoo et al. 2011, S. 339 ff.]. Durch den Einsatz eines hierarchischen Benutzerkonzeptes können Verantwortlichkeiten, Rechte und Regeln festgelegt werden. Die Sperrung von bestimmten Bereichen oder Ressourcen, eine zeitliche Begrenzung der Nutzung des Systems oder ein eingeschränktes Handlungsfeld für ausgewählte Planer sind mögliche Ergebnisse. Als führender Teil muss das Feinplanungssystem die von den unterschiedlichen Akteuren (Benutzer und System) eingebrachten Änderungen koordinieren und verarbeiten können.

#### *Prüfung einer partiellen Planänderung*

Eintretende Ereignisse betreffen oft nur Teile der Fertigung bzw. einzelne Stufen einer Hybrid-Flow-Shop Produktion. Um eine möglichst hohe Planstabilität zu gewährleisten sollten nur die potenziell anzupassenden Stufen durch das Feinplanungssystem ermittelt werden. Das Feinplanungsverfahren muss daher entsprechend der vorliegenden Anforderung modular aufgebaut sein, um flexibel auf jede Situation reagieren zu können. Damit lässt sich zusätzlich die Leistungsfähigkeit erhöhen, da Teilplanungen weniger zeitintensiv sind und somit Ergebnisse schneller vorliegen [Dittrich 2001, S. 31].

#### *Modellgenauigkeit*

Die Digitalisierung von Produkten, Prozessen und Systemen entlang der Wertschöpfungskette ist das Ergebnis einer rechnergestützten Planung und Steuerung [Schenk et al. 2014, S. 90]. Trotz stetig steigender Möglichkeiten einer schnellen Datenverarbeitung durch die Verbesserung von Rechnerleistungen vgl. [Mack 2011, S. 202 f.], können virtuell erstellte Pläne nur sinnvoll auf die reale Produktion übertragen werden, wenn eine hohe Übereinstimmung zwischen Modell und Realität vorliegt. Somit stellt die Modellgenauigkeit<sup>36</sup> eine der höchsten Anforderungen an das System dar. Neben der bestmöglichen Nachbildung der betrieblichen Situation sind verschiedenste Nebenbedingungen sowie eine große Vielfalt von Variablen zu verarbeiten [Dittrich 2001, S. 32].

---

<sup>35</sup> Mixed-Initiative beschreibt allgemein, dass unterschiedliche Akteure einer Gruppe die Initiative ergreifen können; u.a. untersuchten Burstein und McDermott verschiedene Mixed-Initiative Planungssysteme von Mensch und Maschine. Sie leiteten daraus ab, dass positive Beiträge zur Analyse, zur Entwicklung sowie zur Verbesserung von Plänen generiert werden können, vgl. Burstein & McDermott [1996].

<sup>36</sup> Nach Braess und Seiffert hat sich die Modellgenauigkeit in den letzten 15 Jahren um den Faktor 100 erhöht, Modellstände können somit Datenmengen von mehreren tausend Gigabytes umfassen, Braess & Seiffert [2012, S. 898].

## 2.8.4 Anforderungen an zukünftige Feinplanungsverfahren

### Rechenzeit

In der betrieblichen Praxis gehören Störungen (verursacht z. B. durch Maschinenstillstände, Personalausfälle oder verspätete Aufträge) des geplanten Fertigungsablaufs zum Tagesgeschäft. Planabweichungen bilden somit nicht die Ausnahme, sondern die Regel. Ziel muss es daher sein, den aktuellen Fertigungsplan im Fall einer Abweichung schnellstmöglich hinsichtlich Qualität und Ausführbarkeit zu prüfen. Liegt im Ergebnis ein unzureichender Fertigungsplan vor (unausführbar oder verbesserungswürdig), sollte zeitnah eine Anpassung erfolgen. Auch Regelereignisse, wie beispielsweise das Eintreffen eines neuen Auftrags, stellen für das zukünftige Feinplanungssystem eine potenzielle Störung dar, welche die Notwendigkeit einer Überprüfung und ggf. eine Anpassung zur Folge hat. Während der Planneuausrichtung werden alle betroffenen Ressourcen für neue Aufträge gesperrt [Aufenanger 2009, S. 20]. Eine zeitintensive Erstellung kann zu Verzögerungen, Stillständen und somit zu höheren Kosten in der Produktion führen<sup>37</sup>. Eingesetzte Feinplanungsverfahren dürfen für die Überprüfung aktueller sowie für die Erzeugung neuer Pläne möglichst wenig Rechenzeit benötigen<sup>38</sup>. Dabei ist nicht relevant, ob die Ergebnisse von einem Maschinenbediener genutzt werden oder eine Übermittlung an ein CPS erfolgt. Alle ausführenden Organe in der Fertigung benötigen im Idealfall vor jeder zu treffender Entscheidung (echtzeitbasiert) auch den bestmöglichen Plan. Puente und Kiencke unterscheiden in harte und weiche Echtzeitbedingung [Puente & Kiencke 2006, S. 10]:

*Harte Echtzeitbedingung:* Die Bearbeitung (Systemdurchlaufzeit  $\tau_d$ ) ist für jeden Ereignistyp  $e_i$  beendet, bevor ein weiteres Ereignis gleichen Typs eintrifft. Es gilt:

$$\tau_d(e_{i,n}) < t(e_{i,n+1}) - t(e_{i,n}) \quad ; \forall i, n \quad (2.1)$$

*Weiche Echtzeitbedingung:* Es erfolgt ein Vergleich der mittleren Systemzeit  $\bar{\tau}_d$  mit der mittleren Ankunftsintervallzeit  $\bar{\tau}_\alpha$  der Ereignistypen  $e_i$ . Die Bedingung ist erfüllt, wenn

$$\bar{\tau}_d < \bar{\tau}_\alpha \quad (2.2)$$

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll der Begriff der Echtzeitfähigkeit eines Systems im logistischen Kontext in Anlehnung an Jedermann et al. verstanden werden als Zustand, bei dem synchron zu der Zeit, die Abläufe in der Realität benötigen Entscheidungen getroffen werden können, vgl. [Jedermann et al. 2006].

### Qualität der Lösung

Die Qualität der Lösung, also die Abweichung vom optimalen Zielfunktionswert [Nissen 1997], stellt neben der benötigten Rechenzeit den zweiten Kernbereich zukünftiger Feinplanungsverfahren dar. Die vorliegende Komplexität des Ausgangsproblems (vgl. Abschnitt 2.6) ist gegenläufig zur Forderung nach einer möglichst geringen Rechenzeit. Somit muss es das Ziel sein, eine möglichst gute Lösung innerhalb

<sup>37</sup> vgl. dazu auch Li, Lui und Wu, die auf die Notwendigkeit schneller Systeme im betrieblichen Umfeld eingehen: „Fast computation methods are needed for the heuristics of [...] scheduling problems in practical manufacturing environments.“ Li et al. [2006, S. 12 ff.].

<sup>38</sup> nach van Wezel wird die algorithmische Feinplanung durch die (immer noch) nicht ausreichende Rechnerleistung stark erschwert, vgl. Meystel et al. [2006, S. 206 ff.]



einer vertretbaren Zeit zu erzeugen, um echtzeitnahe Entscheidungen treffen zu können<sup>39</sup>. Heuristiken bieten den Vorteil, die Optimierung nach festgelegten Zeiten zu beenden und damit die (bis dahin) beste Lösung zu akzeptieren. Der in der Literatur oft beschriebene Vergleich zwischen einfachen und komplizierten Verfahren bei der Entwicklung von Lösungsverfahren lässt den Rückschluss zu, dass bei (annähernd) gleicher Lösungsgüte das einfachere Verfahren vorzuziehen ist [Georgi 1995, S. 91]. Gründe dafür bestehen in einer höheren Akzeptanz und Implementierung von einfacheren Verfahren. Erzielen kompliziertere Verfahren theoretisch bessere Lösungen, ist abzuwägen, ob dieser Zusatznutzen praktisch umsetzbar ist und somit den Mehraufwand für die Implementierung und den Betrieb gerechtfertigt [Lödding 2016].

## 2.9 Zusammenfassung

Die Fertigungsfeinplanung in Unternehmen als komplexes Optimierungsproblem wird seit vielen Jahren untersucht. Steigende interne und externe Anforderungen erhöhen den Grad der Komplexität des Produktionssystems stetig. Reale Problemgrößen gehören in der Regel zur Klasse der NP-vollständigen Probleme, die aktuell nicht mit vertretbarer Rechenzeit exakt gelöst werden können. Dem gegenüber steht die Anforderung einer kontinuierlichen und echtzeitfähigen Entscheidungsfindung in der betrieblichen Praxis. Der Planer als alleiniger Entscheider und Ausführer der Feinplanungs-Assistenzsysteme ist oft mit der Situation überfordert. Hinzu kommt, dass die Auswirkungen von einfachen, lokal getroffenen Entscheidungen durch den Planer für das Gesamtsystem nicht oder nur teilweise abschätzbar sind. Dadurch werden unausführbare Pläne erzeugt und anschließend unter großen Anstrengungen lediglich in ausführbare umgewandelt, ein Anspruch auf möglichst gute, den Zielvorgaben entsprechende Pläne geht in der heutigen Praxis schnell verloren.

Zukünftige Produktionssysteme werden sich im Kontext von „Industrie 4.0“ entscheidend verändern. Obermaier sieht dazu neben den „Gesetzen der Digitalisierung“<sup>40</sup> vornehmlich die Treiber Wettbewerbsdruck, Kostendruck und gestiegene Anforderungen (z. B. Zeit-, Qualitäts- und Variantendruck) an die Produktion als verantwortlich an [Obermaier 2016, S. 12]. Der Weg zur „Smart Factory“<sup>41</sup> ist neben der horizontalen Integration von IT- und Produktionssystemen gekennzeichnet durch eine vertikale Integration, die es möglich macht, Daten und Informationen direkt aus der Feldebene zu erheben und an die informationsverarbeitenden Systeme weiterzugeben. Die Steuerungs- und Leitebenen führen die ermittelten Steuerungsinformationen anschließend an die ausführenden Abteilungen, möglichst in Echtzeit, zurück [Roth 2016, S. 29].

Um den wachsenden Anforderungen der Produktionsplanung gerecht werden zu können, müssen sich zukünftige Feinplanungssysteme entscheidend weiterentwickeln. Nicht der Planer, sondern eintretende Ereignisse im Produktionssystem sollten darüber entscheiden, wann und wie das Feinplanungssystem handelt. Der Planer sowie auch die Planausführer in der Fertigung sollten jederzeit über den bestmöglichen, durch das Feinplanungssystem ermittelten Plan verfügen können, ohne vorab manuelle Einstellungen vornehmen zu müssen. Störungen sind daher zukünftig unter

---

<sup>39</sup> vgl. dazu Dittrich: „Aus dem Primat einer durchführbaren und schnell ermittelbaren Lösung ergeben sich zwangsläufig Abstriche bezüglich der Optimalität“ Dittrich [2001, S. 31].

<sup>40</sup> Bereits 1988 definierte Zuboff drei Gesetze der Digitalisierung, darunter das Erste: „Alles, was digitalisiert und in Information verwandelt werden kann, wird digitalisiert und in Information verwandelt“ Zuboff [1988]. Obermaier ergänzt dazu ein viertes Gesetz, mit dem er auf die Notwendigkeit der Vernetzung eingeht, Obermaier [2016, S. 10].

<sup>41</sup> Die intelligente (smarte) Fabrik als Element der Industrie 4.0 ist umfassend vernetzt und wendet das Internet der Dinge an. Störanfälligkeiten sollen damit gesenkt sowie die Effizienz der Produktion gesteigert werden, vgl. Bracht et al. [2018, S. 15]. Eine selbstverständliche Kommunikation von Menschen, Maschinen und Ressourcen bildet die neue Grundlage der Informationsübertragung einer smarten Fabrik, vgl. FWW [2013].

Echtzeitbedingungen zu analysieren und ggf. in den Plan einzuarbeiten. Diese Forderung stellt sich derzeit als der größte Schwachpunkt bestehender Feinplanungssysteme dar. Abbildung 2.15 fasst die zukünftigen Anforderungen zusammen.

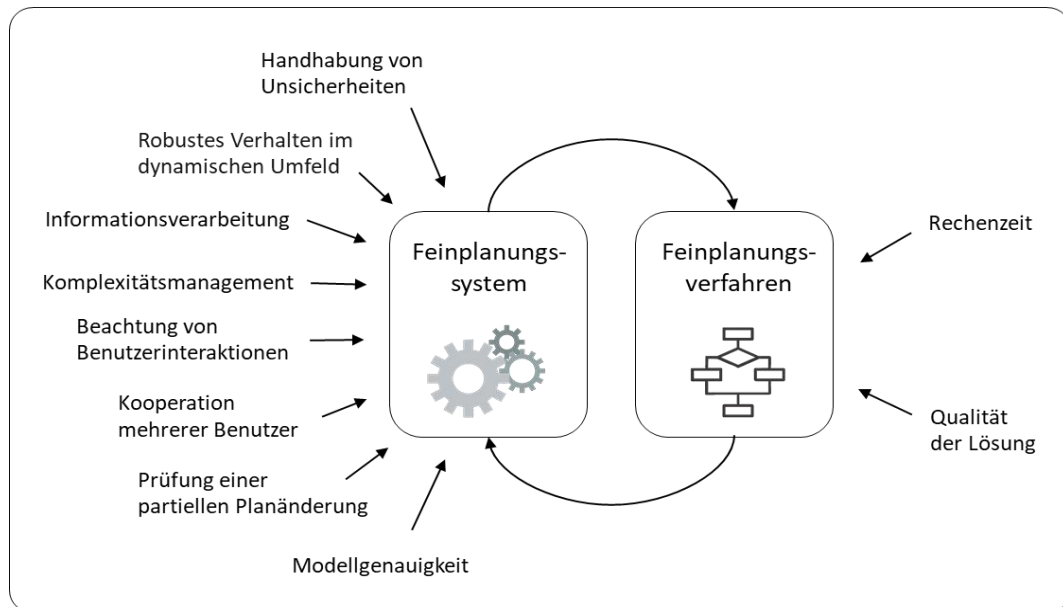


Abbildung 2.15: Anforderungen an zukünftige Systeme und Verfahren zur Unterstützung einer echtzeitfähigen Fertigungsfineplanung

## 3 Das Hybrid-Flow-Shop Problem - Fertigungsregelung und Lösungsstrategien

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Betrachtung des Hybrid-Flow-Shop Problems, welche die Definition und bekannte Strategien zur Lösung beinhaltet. Ergänzend werden derzeitige Planungsstrategien einer HFS-Produktion sowie Möglichkeiten zur Fertigungsregelung analysiert. Die dafür berücksichtigten Gebiete der Materialflusstechnik, Informatik sowie Verfahrensforschung zählen zu den produktionslogistisch bedeutendsten Forschungsbereichen der Fertigungssteuerung [Kienzle 2011, S. 20]. Die Verfahrensforschung, die ihre Aufgabe vor allem in der ablauforganisatorischen Gestaltung der Fertigungssteuerung sieht, kann in die Bereiche des Operations-Research sowie der nicht mathematischen Verfahrensforschung gegliedert werden. Dabei betrachtet der Bereich des Operations-Research meist theoretische Sachverhalte während die Verfahrensforschung praktikable Heuristiken untersucht. Die vorliegende Arbeit soll einen praxisrelevanten Beitrag zur Fertigungssteuerung liefern und konzentriert sich somit primär auf Ansätze und Verfahren der nicht mathematischen Verfahrensforschung.

### 3.1 Planungsstrategien einer Produktion

#### *Prädikative Planung*

Ziel einer prädikativen Planung der Produktion ist die Generierung eines Ablaufplans, der aufgrund von unvollkommen vorliegenden Informationen unter Annahme einer statischen Planungsumgebung vorrausschauend für einen bestimmten Zeitbereich erstellt wird. Nach Sauer stehen besonders zeit-, ressourcen- und kostenbezogene Ziele im Fokus [Sauer 2002b, S. 12]. Da in den meisten Systemen dynamische Unsicherheiten auftreten, ist das Problem zunächst in die statische Umgebung zu transformieren, bevor ein proaktiver Plan erstellt werden kann. Um anschließend eine Ausführbarkeit garantieren zu können, muss der ungünstigste anzunehmende Fall berücksichtigt werden [Aytug et al. 2005, S. 86 ff.]. Der erstellte Plan ist mit dem Auftreten einer (nicht geplanten) Abweichung mindestens überprüfungswürdig. Muss anschließend ein neuer Ablaufplan erstellt werden, können bereits bestehende Teilpläne genutzt werden oder es erfolgt eine komplette Neuerstellung [Sauer 2002b, S. 12].

#### *Proaktive Planung*

Ähnlich der prädikativen Planung erfolgt die Erstellung eines proaktiven Ablaufplans in einer statischen Planungsumgebung. Es wird hierbei versucht, zukünftige Unsicherheiten und Störeinflüsse bereits bei der Planerstellung zu berücksichtigen, um somit einen robusten Plan zu gewährleisten, der keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Zulässigkeit hat [Raheja & Subramaniam 2002, S. 756 ff.]. Bei der Erstellung proaktiver Pläne werden zusätzliche Ressourcen vorgehalten, um entsprechende Kapazitäten zur Verfügung zu stellen. Treten entgegen der Planung keine, weniger oder andere Störeinflüsse auf, kommt es zu Effektivitätseinbußen in der Fertigung.

### Reaktive Planung

Praxisnah unterstellt die reaktive Planung eine dynamische Planungsumgebung, in der es jederzeit zu Veränderungen kommen kann. Tritt eine Störung auf, die dazu führt, dass der aktuelle Plan nicht mehr gültig ist, muss eine Anpassung durchgeführt werden. Diese erfolgt „begleitend“ während der Ausführung des alten Plans und muss damit folgende Anforderungen möglichst gut erfüllen [Dorn et al. 1994, 39 ff.; Henseler 1998]:

- eine schnelle Reaktion
- keine Verschlechterung der Gesamtplanqualität
- wenige Änderungen am bestehenden Plan

Wird ausschließlich eine reaktive Planungsform gewählt, liegt der Fokus im Nahbereich bzw. im Bereich der aufgetretenen Veränderung. Das hat zur Folge, dass in Bezug auf den mittel- und langfristigen Planungshorizont mitunter schlechte Entscheidungen getroffen werden [Aytug et al. 2005, S. 86 ff.].

Generell ist festzustellen, dass in einer praxisnahen, dynamischen Umgebung ein zielführendes Handeln nach statisch erzeugten Plänen, die anschließend nicht mehr verändert werden, nicht sinnvoll und durchführbar ist. Abbildung 3.1 zeigt Möglichkeiten und Arten auf, der bestehenden Dynamik Rechnung zu tragen.

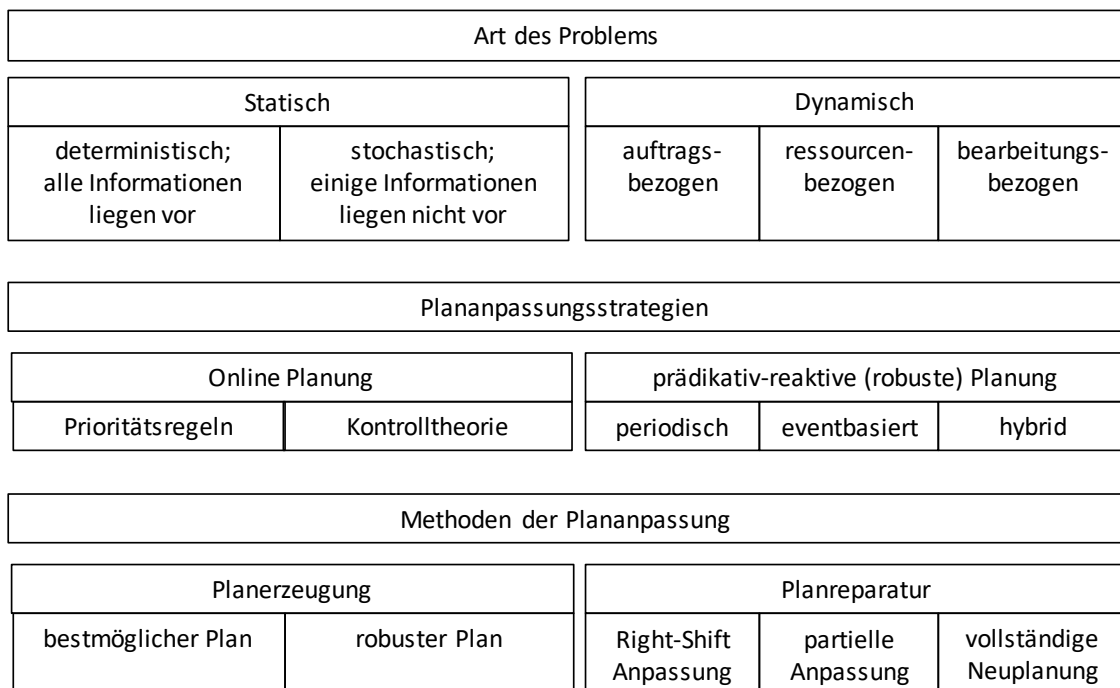


Abbildung 3.1: Framework zur Plananpassung im dynamischen Umfeld, modifiziert nach [Vieira et al. 2002, S. 44]

Im realen Produktionsprozess können unterschiedliche Arten von Störungen auftreten. Niehues entwickelt dazu im Rahmen seiner Dissertation vier *Störungsklassen* [Niehues 2016, S. 93]:

- Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs,
- Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots,
- Erhöhung der Kapazitätsnachfrage und
- Reduzierung der Kapazitätsnachfrage.

In der betrieblichen Praxis kommt es häufig zu kleineren Abweichungen des zeitlichen *Ist-* zum *Plan-Verlauf*, oft hervorgerufen durch Kleinststörungen etwa bei der Materialversorgung, qualitativ notwendigen Nacharbeiten, der Vertauschung von Aufträgen durch den Maschinenbediener oder technischen Problemen bei der Bearbeitung der Aufträge. Nach Patig werden Planabweichungen auch durch abweichende Bearbeitungszeiten der Aufträge, also fehlerbehaftete Planzahlen, hervorgerufen [Patig 2001, S. 11 ff.].

Ausfälle von Maschinen oder Mitarbeitern können zu einer *temporären Reduzierung des Kapazitätsangebots* führen. Entgegen der Sichtweise von Niehues, der eine temporäre Erhöhung des Kapazitätsangebots für unwahrscheinlich hält [Niehues 2016, S. 93], ist im Bereich der Leiterplattenbestückung ein diesbezügliches Handeln durch Schichterweiterung (beispielsweise von 2 auf 3 Schichten) ein gängiges Mittel, einer erhöhten Kapazitätsnachfrage gerecht zu werden.

Kurzfristige Auftragsspitzen und neu priorisierte Aufträge führen schnell zu einer *erhöhten Kapazitätsnachfrage*, die sich direkt auf das bestehende Produktionsprogramm auswirkt. In Hinblick auf den Anspruch, stets den bestmöglichen Fertigungsplan verfügbar zu haben, wird eine Erhöhung der Kapazitätsnachfrage als Störung angesehen, die eine Überprüfung und ggf. Anpassung des bestehenden Plans nach sich zieht. Gleiches gilt auch für den Wegfall von bereits eingeplanten Aufträgen, was einer reduzierten Kapazitätsnachfrage entspricht. Um potenzielle Leerzeiten von Maschinen und Personal zu vermeiden, sollte auch bei dieser Art von Störung eine Überprüfung des bestehenden Plans erfolgen.

### *Online-Planung*

Eine Online Planung, auch als “completely reactive scheduling” oder „dynamische Planungsstrategie“ bezeichnet, liegt vor, wenn der Ausführungszeitpunkt vorab nicht definiert und nur durch die nächste zu treffende Entscheidung festgelegt wird. Diese findet während des Realbetriebes statt. Bezeichnend für Online-Scheduling-Probleme ist, dass eine Planung auf Grundlage unvollständiger Daten erfolgt. Dabei wird nicht das gesamtheitliche Problem betrachtet, sondern ausschließlich die nächste Entscheidung realisiert. Warteschlangen oder Auftragslisten, die mit Hilfe von einfachen (schnellen) Prioritätsregeln optimiert werden, können Beispiele dafür sein, aber auch komplexere Algorithmen wurden hierzu im Rahmen der Kontrolltheorie erforscht. Gerade im hochdynamischen Umfeld hat sich die Online Planung als wirksam erwiesen [Herrler 2007, S. 32], wenngleich (durch die fehlende Gesamtbetrachtung des Problems) eine Optimierung kundenspezifischer Zielgrößen wie Durchlaufzeit oder Liefertermintreue problematisch ist.

Nach Sgall und Pruhs et. al. können 3 generelle Paradigmen des Online-Schedulings unterschieden werden [Sgall 1998, S. 196 ff.; Pruhs et al. 2004, S. 15]:

- One-by-one Scheduling  
(nur der nächste Auftrag einer Liste wird verplant, für den sämtliche Informationen vorliegen)
- Unknown processing times  
(fehlende Informationen über Bearbeitungszeiten der Aufträge, ggf. wird die gesamte Warteschlangenmenge an Aufträgen berücksichtigt)

- Jobs arrive over time  
(individuelle Freigabezeiten der Aufträge mit vorab fehlenden Informationen; dynamisches Scheduling-Problem [Kadipasaoglu et al. 1997, S. 1359 ff.]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Online-Planung zur Anwendung kommt, wenn eine unvollständige Informationslage sowie zukünftige Unsicherheiten auf die Forderung einer Echtzeitsteuerung treffen [Herroelen & Leus 2005, S. 28].

In der wissenschaftlichen Literatur existieren nur wenige Ansätze HFS-basierter Probleme, die eine (ausschließliche) reaktive Vorgehensweise beschreiben. So versuchen Guo und Nonaka ein dreistufiges HFS-Problem zu lösen, wobei die Gesamtdurchlaufzeit minimiert werden soll [Guo & Nonaka 1999, S. 503 ff.]. Dazu schränken sie jedoch ein, dass immer nur eine Störung auftreten kann (vergleiche Kapitel 4.4.1). Mit Hilfe von Trigger-Werten wird anschließend ermittelt, ob eine Änderungsplanung vollzogen werden muss. Das Ziel eines möglichst raschen Zurückkehrens zum Ursprungsplan und damit eine Minimierung der Anzahl verspäteter Aufträge verfolgen Akturk und Gorgulu mit ihrem entwickelten Verfahren [Akturk & Gorgulu 1999, S. 81 ff.]. Begründet wird dieses Vorgehen mit der einstigen Ressourcenplanung, die möglichst wieder herzustellen ist, um Stabilitätseinbußen zu vermeiden.

Havill und Mao greifen das Problem  $FHm, ((QM^{(k)})_{k=1}^m) \parallel C_{max}$  auf, wobei für jeden dynamisch eintreffenden Job die nächste, am schnellsten verfügbare Maschine ermittelt wird [Havill & Mao 1998, S. 134 ff.]. Mit Hilfe des Tabu Search Verfahrens (siehe Abschnitt 3.3.2) versuchen Yang et al., dem Problem  $FHm, ((PM^{(k)})_{k=1}^m) \parallel \sum T_j$  zu begegnen, wobei einfache Prioritätsregeln die dafür notwendige Ausgangslösung generieren [Yang et al. 2004, S. 4015 ff.]. Lieferterminbezogene Ziele stehen hingegen im Fokus der Arbeit von Takaku und Yura, die durch die Verwendung des Greedy Verfahrens im Zusammenspiel mit einfachen Prioritätsregeln einen „Online“ Charakter entwickeln [Takaku & Yura 2005, S. 21 ff.].

Festzustellen ist, dass zur Lösung von komplexen und vollständig reaktiven HFS-Problemen größtenteils einfache und möglichst schnelle Heuristiken eingesetzt werden, die bei unerwarteten Ereignissen zügig und möglichst produktionsbegleitend neu ausgeführt werden können [Kochhar & Morris 1987a, S. 299 ff.]. Dieses Vorgehen sichert die benötigte Reaktionsfähigkeit, weist jedoch große Nachteile bezüglich der Lösungsqualität auf. Weiterhin ist zu konstatieren, dass das Auftreten von Störungen und eine diesbezügliche Erarbeitung von Konzepten und Lösungsmöglichkeiten in der Forschung bislang keine große Beachtung findet.

#### *Prädikativ-Reaktive Planung*

Durch die Kombination von prädikativen und reaktiven Inhalten wird versucht, die Vorteile beider Verfahren zu vereinen. Eine zweistufige Planungsstrategie entsteht, bei der zunächst ein prädikativer, möglichst den Zielkriterien entsprechender Plan in der Annahme einer statischen Planungsumgebung generiert wird. Vorteile der prädikativen Planerstellung sind zum einen die Möglichkeit, „offline“ einen Plan zu erstellen und zu optimieren, aber auch Informationen für mittel- und langfristige Aktivitäten wie Materialbeschaffung oder Ressourceneinteilungen bereitzustellen [Metha & Uzsoy 1998, S. 365 ff.]. Entgegen der Online Planung ist es möglich, alle Produktionsprozesse der oft komplexen, mehrstufigen Fertigung miteinander (in einem Plan) abzustimmen.

Treten im Produktivbetrieb planungsrelevante Ereignisse auf, erfolgt eine reaktive Anpassung an die neue Situation [Henning & Cerda 2000, S. 2315], um die Zulässigkeit des aktuellen Plans wiederherzustellen [Neuhaus 2008, S. 58]. Dazu kommt es zum iterativen Durchlauf der Prozesse Evaluierung, Anpassung und Revision [Wu & Li 1995, S. 2097 ff.].

Zunächst werden während der Evaluierung mögliche Auswirkungen der vorliegenden Störung auf den bestehenden Plan ermittelt. Nur bei einer erheblichen Verschlechterung erfolgt eine Anpassung des bestehenden, nun veralteten Plans in der folgenden Anpassungsphase. Die zur Planreparatur (von ressourcenbedingten Störungen) eingesetzten Methoden können in die Strategien

- *Verschiebung* (z. B. Right-Shifting), bei der eine Verschiebung der Aufgaben entsprechend der Dauer der Störung erfolgt,
- *partielle Planreparatur*, bei der nur direkt oder indirekt von der Störung betroffene Bereiche neu geplant werden sowie
- *komplette Neuplanung*, bei der losgelöst vom Ort der Störung eine komplette Neuerstellung des gesamten Plans erfolgt, eingeteilt werden (vgl. Abbildung 3.1).

Die Phase der Revision hat zur Aufgabe, eine Überprüfung der Anpassungsphase anhand von festgelegten Zielkriterien durch einen Vergleich der Pläne durchzuführen. Mitunter ist es notwendig, die Anpassungsphase mit modifizierten Parametern so oft zu wiederholen, bis ein akzeptabler Plan vorliegt.

## 3.2 Möglichkeiten zur Durchführung der Fertigung

### 3.2.1 Modell der Fertigungsregelung

Fertigungssterverfahren können nach ihrer primären Regelgröße klassifiziert werden. Abbildung 3.2 zeigt ein Regelmodell, bei dem die Produktionssteuerung als Regelkreis verstanden wird und welches als Grundlage der weiteren Betrachtungen dienen soll [Strack 1986, S. 10 ff.; Hackstein 1989, S. 29 ff.; Wiendahl et al. 1993, S. 352 ff.; Wiendahl 2010, S. 346 ff.]. Demnach kann die Fertigung als ein solches Modell aufgefasst werden, dessen Regelgrößen Bestand/ Belastung (Arbeitsinhalte, Stückzahlen), Rückstand und Leistung (Kapazitätsauslastung) permanent mit einer definierten Führungsgröße abgeglichen werden [Duffie & Falu 2002, S. 379 ff.; NYHUIS et al. 2009, S. 239 ff.]. Die Anpassung einer Stellgröße kann ein Ergebnis aus dem Abgleich sein, wobei sich die Regelung auf ein Maximum oder Minimum der Führungsgröße bezieht [Lödding & Wiendahl 2005].



Abbildung 3.2: Modell einer Fertigungsregelung [Kienzle 2011, S. 23]

Von Störgrößen beeinflusst regelt die Produktionssteuerung somit die Führungsgröße bzw. das Steuerungsziel Produktionsprogramm/ -plan. Die Regelgrößen Bestand, Rückstand und Leistung ergeben sich dabei aus kontinuierlich zurückgemeldeten Produktionsdaten [Arping 1977, S. 13 f.].

Weitere Bestandteile der Produktionsregelung können Störreaktionen und Zielwertvorgaben sein [Zetlmayer 1993, S. 21; Reinhart & Simon 1995, S. 86 ff.]. In Abbildung 3.3 sind Strategien zur dynamischen Produktionsregelung zusammengefasst, wobei Niehues ausschließlich auf vollständig-reaktive (Online-Regelung) und prädikativ-reaktive Methoden eingeht.

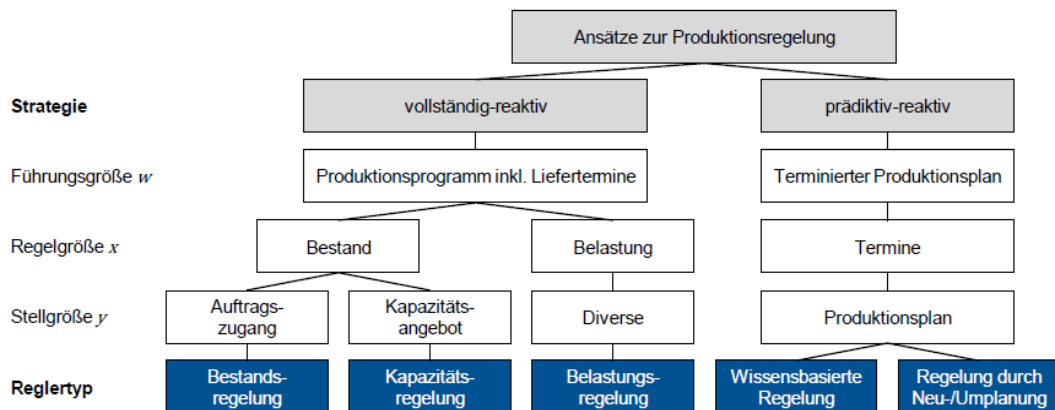


Abbildung 3.3: Steuerungsstrategien zur Produktionsregelung [Niehues 2016, S. 21]

### 3.2.2 Ansätze zur Steuerung der Fertigung

#### Bestandsregelnde Ansätze

Bestandsregelnde Ansätze verfolgen das Ziel, eine Steuerung der Fertigung mit Hilfe der Variierung des Auftragszugangs (und somit der Bestandshöhe in der Produktion) zu gewährleisten.

Zu den bedeutenden zentralen bestandsregelnden Ansätzen zählen:

- die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe BOA [Bechte 1988, S. 375 ff.],
- die Belastungsorientierte Fertigungssteuerung BOS-F [Wiendahl 1987, S. 1 ff.],
- das Bestellbestandsverfahren BBV [Lödding 2016, S. 181 ff.],
- die Regelung des Auftragszugangs bei einer belastungsorientierten Fertigungssteuerung BOS-F [Kingsman et al. 1989b, S. 206 ff.; Moreira & Alves 2009, S. 2805 ff.],
- die Constant Work in Process – Steuerung CONWIP [Spearman et al. 1990, S. 879 ff.] sowie
- die Basestock-Steuerung [Graves 1988, S. 67 ff.].

Für weitere zentrale Verfahren wird auf Land und Gaalman sowie Breithaupt et al. verwiesen [Land & Gaalman 1996, S. 535 ff.; Breithaupt et al. 2002, S. 625 ff.].

Bedeutende dezentrale Ansätze, die den Bestand einzelner Teilbereiche fokussieren sind beispielsweise:

- die Pull-from-Bottleneck (PFB)-Strategie [Hopp & Spearman 2001, S. 503 f.],
- die Kapazitätsorientierte und Bestandsregelte Auftragsfreigabe KOBRA [Nittka 1995],
- die Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung (DBF) [Lödding 2001] sowie
- die POLCA-Steuerung [Krishnamurthy & Suri 2009, S. 596 ff.].



Als zentrales Ziel verfolgen die aufgezeigten Verfahren eine Kontrolle der Auftragsdurchlaufzeiten bei möglichst guter Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten. Wie bereits erwähnt, führt eine Schwankung der Durchlaufzeiten schnell zu einer schlechten Liefertermintreue, da verlässliche Aussagen bezüglich der Fertigstellung von Aufträgen erschwert werden.

#### *Kapazitätsregelnde Ansätze*

Mit dem Ziel möglichst weniger Parameteränderungen führen *kapazitätsregelnde Ansätze* einen Abgleich von Kapazitätsangebot und -bedarf durch. Das Verfahren der „Rückstandsregelung“ misst sowohl den zeitlichen, als auch den mengenmäßigen Produktionsrückstand der einzelnen Stufen und passt bei Bedarf die entsprechenden Kapazitäten an [Kienzle 2011, S. 32]. Viele Ressourcen weisen allerdings nicht die dafür notwendige Kapazitätsflexibilität auf. Das Verfahren der „Leistungsmaximierenden Kapazitätssteuerung“ ist bestrebt, die engpassvorgelegerten Fertigungsbereiche durch das Bereitstellen von genügender Kapazität gut zu versorgen, um damit möglichst keine Ausfälle aufgrund von fehlenden Materialien an den Engpassmaschinen zu ermöglichen. Lödding erweitert und unterteilt die Verfahren der Kapazitätssteuerung in planorientiert, terminorientiert, (leistungsmaximierend) sowie bestandsregelnd [Lödding 2016, S. 573 ff.]. Als weitere Ansätze sind die Arbeiten von Petermann zur „Modellbasierten Produktionsregelung“ [Petermann 1996] oder Begemann aufzuführen, der die „Terminorientierte Kapazitätssteuerung“ in seinen Fokus stellt [Begemann 2005].

#### *Belastungsregelnde Ansätze*

Belastungsregelnde Ansätze als Teil einer vollständig- reaktiven Strategie versuchen, die Fertigungslast möglichst ausgeglichen zu gestalten. Der Ansatz von Busch schafft durch entsprechende Erweiterungen der Durchsatzregelung zusätzlich die Möglichkeit, den Zufluss zu Engpassmaschinen bei Bedarf zu erhöhen [Busch 1987, S. 18 ff.]. Andere Arbeiten erweitern die „Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung“ um Reihenfolgeparameter und eine engpassbezogene Regelung von Kapazitäten [Märtens et al. 2007b, S. 471 ff.; Reinhart et al. 2013, S. 331 ff.]. Eine dezentrale Regelung der Produktionssysteme mit Hilfe von Reihenfolge und Kapazität verfolgt Brinzer, der dazu u. a. Bestands- und Terminvorgaben höherer Hierarchien nutzt [Brinzer 2005]. Kritisiert werden muss, dass es bei allen vollständig-reaktiven Ansätzen zu keiner exakten Terminierung des Durchlaufs kommt [Niehues 2016, S. 24]. Somit kann auch keine umfassende Kapazitäts- und Terminplanung erfolgen.

#### *Wissensbasierte Ansätze*

Wissensbasierte Ansätze zur Regelung der Produktion beziehen sich auf einen prädikativ erstellten Produktionsplan, der bei entsprechenden Störungen reaktiv und lokal angepasst wird. Als frühe Arbeit kann dazu der „Beitrag zur rechnergestützten Fertigungsregelung“ von Arping gezählt werden, der einen ereignisorientierten und störungsbezogenen Eingriff in die Produktion beschreibt, um entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten [Arping 1977]. Selbstlernende Systeme zeichnen sich dadurch aus, neben den vorab festgelegten Regeln ihre Wissensbasis durch das Auswerten von Daten und Entscheidungsauswirkungen zu verbessern. Mit Hilfe von Fuzzy-Logik werden in den Ansätzen von Weinbrecht und Wiendahl et al. Maßnahmen bestimmt und dem Planer vorgeschlagen [Weinbrecht 1993; Wiendahl et al. 1993, S. 352 ff.]. Die hierarchischen Ansätze von Bley et al. und Jostock fungieren hingegen offen und sind als interaktive Assistenzsysteme für den Planer konzipiert [Jostock 1994; Bley et al. 1995]. Schließlich entwickelt [Martin 1998] eine, für mehrstufige und heterogene

Produktionssysteme automatisierte Regelung der Auswahl von Maßnahmen durch ein Expertensystem.

### *Regelungen der Um- oder Neuplanung*

Entgegen den ausschließlich lokalen Modifikationen wissensbasierter Ansätze verändern Regelungen der Um- oder Neuplanung größere Teilbereiche bzw. den gesamten Plan der Fertigung. Dabei geht die Neuplanung ohne Vorkenntnisse prädikativ vor, während die Umplanung auf einen bestehenden Plan aufsetzt und versucht, diesen gemäß der neuen (Stör-)Informationen zu verändern. Viele Arbeiten nutzen einfache Heuristiken, um Modifikationen an Belegungsplänen vornehmen zu können. Schnelle Umplanungen können somit realisiert werden. Ein Beispiel dafür ist der Ansatz von Beckendorff, der mit Hilfe von gängigen Prioritätsregeln notwendige Änderungen durchführen lässt [Beckendorff 1991]. Weller generiert bei auftretenden Störungen einen Störplan, der übergangsweise das Weiterproduzieren sichern soll. Parallel dazu erfolgt eine Optimierung des Gesamtplans [Weller 2002]. Brackel nutzt hingegen eine parallel zur Produktion laufende Simulation, um Optimierungen am bestehenden Plan vorzunehmen sowie auf Störungen zu reagieren [Brackel 2009]. Dabei ist das Vorliegen einer Störung keine zwingende Voraussetzung für eine Plananpassung. Der zentrale Ansatz von Simon setzt seinen Schwerpunkt auf die Produktionsüberwachung, die mit Hilfe von freigegebenen Aufträgen und einer daraus kalkulierten Zielerreichung vollzogen wird. Treten Störungen auf, passt Simon ggf. Fertigungstermine an oder generiert einen veränderten Produktionsplan [Simon 1994]. Obwohl die Produktionsregelung in der Praxis nahezu immer aus einem Zusammenspiel von realen Planern und Assistenzsystemen besteht, wird der menschliche Faktor in wissenschaftlichen Ansätzen oft ausgeblendet [McKay & Wiers 2006, S. 195 ff.]. Aufgrund der derzeit eingesetzten, nicht autark agierenden Feinplanungssysteme ist jedoch der Mensch als Entscheider gerade auf der operativen Ebene von entscheidender Bedeutung [MacCarthy et al. 2001, S. 181 ff.]. Als Prädikativ-reaktive Steuerungsansätze, die auf eine Interaktion zwischen Mensch und System eingehen, können die Arbeiten von Kang und Bamberger aufgeführt werden [Kang 1987; Bamberger 1996]. Die verwendeten Systeme bieten dabei jedoch keine ausreichende Möglichkeit einer akzeptablen Lösungsfindung durch Optimierung.

### *Ansätze zur Produktionsregelung einer Hybrid-Flow-Shop Produktion*

In der Literatur sind nur wenige Ansätze zur Produktionsregelung bekannt, die sich dem Thema der komplexen HFS-Produktion annehmen. Kreimeier versucht, mit Hilfe von einfachen Prioritätsregeln, eine Änderung der Auftragsreihenfolge herbeizuführen bzw. alternative Ressourcen zu finden [Kreimeier 1987]. Kupec entwickelt ein wissensbasiertes Leitsystem, welches ausschließlich für flexible Fertigungssysteme konzipiert ist und mit Hilfe von vorab festgelegten Maßnahmen die Dauer von Störungen mit einfließen lässt [Kupec 1991]. Einen proaktiven, robusten Ansatz verfolgt Mahajan, der versucht, vorab alle potentiellen Störungen mit einzuplanen, um somit einer Neuplanung entgegenzuwirken [Mahajan 2007]. Treten dennoch ungeplante Störungen auf, erfolgt eine (möglichst lokale) Umplanung. Sonnenstein entscheidet sich zur Erstellung der Auftragsreihenfolge und Maschinenauswahl in seinem Ansatz für den Einsatz von Fuzzy-Petri-Netzen, die produktionsunabhängig zur Optimierung eingesetzt werden [Sonnenschein 1998]. Rahman versucht das Gebiet der Materialflusssteuerung mit einzubeziehen, indem er die Belegungsplanung dort integriert. Ziel seiner Optimierungen ist die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit [Rahman 2013]. Aufenanger entwickelt ein prädikativ-reaktives Konzept bestehend aus Steuerungs- und Lernkomponente [Aufenanger 2009]. Zusätzlich wird eine Trainingskomponente integriert, um eine entsprechende Wissensbasis aufzubauen. Diese bildet anschließend die Grundlage zukünftiger

Entscheidungen. Brüggemann versucht in seinem Ansatz (eines parametrisierbaren Verfahrens zur Änderungsplanung) durch die Teilung des Planungshorizontes in grob und fein die Komplexität des Problems – und damit die benötigte Zeit einer Lösungsfindung zu verringern [Brüggemann 2010]. Dafür entwickelt er neben einem heuristischen Verfahren ein mathematisches Modell, welches Störeinflüsse mitberücksichtigt. Hegers Ansatz zur Reihenfolgeregelung basiert wiederum auf dem Einsatz einer prioritätsregelbasierten Planung und Steuerung. Er setzt dabei den Schwerpunkt auf die richtige Auswahl der Regel, die mithilfe der Gaußschen Prozesse Regression ermittelt wird [Heger 2014].

### *Zusammenfassung*

In den vergangenen Jahren wurden eine Vielzahl von Methoden zu Produktionsregelung entwickelt. Vollständig-reaktive Verfahren können aufgrund ihrer Online-Fähigkeit schnelle Entscheidungen herbeiführen und damit direkt in den laufenden Prozess eingreifen und diesen regeln. Dem gegenüber steht die fehlende ganzheitliche Planung der Produktion, die für viele Prozesse essenziell wichtig ist. Somit ist es beispielsweise nicht möglich, eine verlässliche Aussage über die Fertigstellung von Aufträgen in der Produktion zu treffen oder langfristig das richtige Material zu planen [Weller 2002, S. 40]. Oft verursacht eine lokale Anpassung eines Steuerungsparameters Änderungen an anderer Stelle der Produktion, die nicht berücksichtigt werden. Eine potenzielle Verschlechterung des Gesamtplans kann nicht ausgeschlossen werden. Aus den genannten Gründen werden vollständig-reaktive Ansätze im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet. Prädikativ-reaktive Verfahren können jederzeit auf einen gesamtheitlichen Produktionsplan zugreifen, in dem alle notwendigen Informationen über den weiteren (geplanten) Fertigungsverlauf vorhanden sind. Dadurch ist es möglich, verlässliche Terminaussagen zu treffen. Auswirkungen von durchgeführten Änderungen werden global berücksichtigt, eine gesamtheitliche Bewertung der Entscheidung ist damit möglich. Wissensbasierte Verfahren verwenden vorab festgelegte Handlungsalternativen, was ihren Lösungsraum stark einschränkt. Fehlende Informationen und Ereignisse, die nicht vorab als Muster hinterlegt wurden, lassen diese Verfahren oft nur in Verbindung mit dem Menschen als sinnvoll einsetzbar erscheinen. Dabei nutzt der Planer sein Erfahrungswissen und die Informationen des Assistenzsystems, um eine Entscheidung zu treffen. Die Vorgehensweise der Um- und Neuplanung bietet prinzipiell die beste Möglichkeit, auftretende Störungen und Änderungen zum Plan hinsichtlich der Zielkriterien zu berücksichtigen. Nachteilig können dabei häufige, globale Planänderungen sein, die zu einer Planungsnervosität führen. Entscheidend für den effektiven Einsatz dieser Verfahren ist die benötigte Reaktionszeit in Verbindung mit der erzeugten Planqualität. Aktuelle Ansätze zur Produktionsregelung einer HFS-Produktion nutzen deshalb oft einfache Heuristiken, die tendenziell qualitativ schlechte Produktionspläne generieren. Im Störfall besteht bei aktuellen Ansätzen das Ziel, möglichst schnell einen ausführbaren Plan zu erzeugen. Eine Verbesserung des Gesamtsystems steht hierbei im Hintergrund. Für die Entwicklung einer Methodik zur Fertigungsfineplanung einer HFS-basierten Produktion bieten sich prädikativ-reaktive Verfahren an. Ein praxisnaher Einsatz kann jedoch nur erreicht werden, wenn die beschriebenen Nachteile (benötigte Rechenzeit vs. Qualität des Plans; Planungsnervosität) behoben werden. In den folgenden Abschnitten werden aus diesem Grund zunächst aktuelle Optimierungsverfahren erläutert, um anschließend auf die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung einzugehen.

### 3.3 Der Hybrid-Flow-Shop

Die Organisationsform des Hybrid-Flow-Shop<sup>42</sup>, eine Verallgemeinerung des Flow-Shops, findet in vielen unterschiedlichen Branchen der heutigen Wirtschaft seine Anwendung. Dazu zählen, neben der Elektronikfertigung, die im Fokus dieser Arbeit steht, auch die Textil-, Chemie-, Lebensmittel- oder Automobilindustrie [Linn & Zhang 1999, S. 57; Quadt 2004; Mirsanei et al. 2011a, S. 965]. Generell wird unter einem Hybrid-Flow-Shop-Problem eine in Serie geschaltete Produktionsumgebung mit mehreren Produktionsstufen  $s$  verstanden, auf denen sich  $m$  parallele Maschinen befinden, vgl. Abbildung 3.4. Trotz unterschiedlicher Varianten können folgende Merkmale als allgemein gültig aufgefasst werden [Ruiz & Vázquez-Rodríguez 2010, S. 1 f.]:

1. Die Anzahl der Produktionsstufen beträgt mindestens 2.
2. Jede Produktionsstufe  $s$  hat  $M^{(s)} \geq 1$  parallele Maschinen, wobei mindestens eine Produktionsstufe den Term  $M^{(s)} > 1$  erfüllt.
3. Die Abarbeitung der Aufträge erfolgt nach dem gleichen Produktionsablauf, wobei einzelne Aufträge Produktionsstufen überspringen können, solange mindestens eine Bearbeitung an einer Stufe erfolgt.

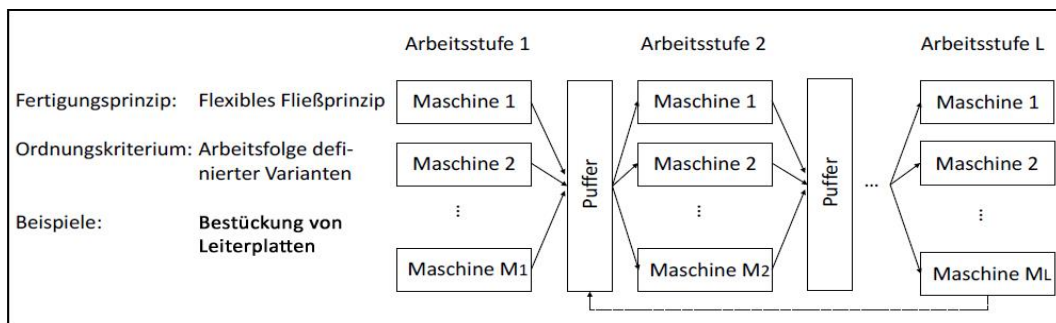


Abbildung 3.4: Hybrid-Flow-Shop als Organisationsform der Fertigung in Anlehnung an [Quadt & Kuhn 2007]

Mit Hilfe des von Graham bereits 1979 eingeführten Notationstripel  $[\alpha|\beta|\gamma]$  lassen sich die verschiedenen Problemtypen genauer charakterisieren, wobei  $\alpha$  die Maschineneigenschaften,  $\beta$  die Randbedingungen und  $\gamma$  die zu untersuchenden Zielfunktionen beschreiben [Graham et al. 1979, S. 287 ff.]. Für die Darstellung von HFS-Problemen ist diese Möglichkeit der Beschreibung oft nicht ausreichend und wird von Vignier entsprechend erweitert [Vignier et al. 1999, S. 117 ff.]. Sein Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die Maschineneigenschaften, repräsentiert durch  $\alpha$ , die folgendermaßen erweitert werden, vgl. hierzu auch [Ruiz & Vázquez-Rodríguez 2010, S. 5]:

- $\alpha_1$  beschreibt den Typ der Maschinenumgebung
- $\alpha_2$  steht für die Anzahl der Produktionsstufen
- $\alpha_3$  definiert die Art der Maschinen, die  $\{\emptyset, P, Q, R\}$  annehmen können
- $\alpha_4$  bezeichnet die Anzahl paralleler Maschinen auf einer Produktionsstufe

Eine exakte Beschreibung des vorliegenden Problems ist somit möglich.

<sup>42</sup> In der Literatur werden die Begriffe „Flexible Flow Shop“, „Flexible Flow Line“, „Flow Shop mit parallelen Maschinen“, „Hybrid-Flow-Shop“ oder „Multiprozessor Flow-Shop“ zur Beschreibung des identischen Problems verwendet. In dieser Arbeit wird dazu ausschließlich der Begriff des Hybrid-Flow-Shop (HFS) genutzt.

### 3.3.1 Mathematische Definition

Für eine grundlegende Betrachtung soll das vereinfachte Basismodell dienen. Bei dieser elementaren Art des Problems sind alle Parameter deterministisch und es liegen vollständige Informationen vor. Zum Einsatz kommen ausschließlich identische parallele Maschinen auf den unterschiedlichen Produktionsstufen, die jeweils nur einen Auftrag bearbeiten. Aufträge können nicht unterbrochen werden, Rüstzeiten und Pufferbegrenzungen werden vernachlässigt [Gondek 2011, S. 17]. Daraus lässt sich das allgemein gültige Standard HFS-Problem wie folgt beschreiben [Brah 1988; Ruiz & Vázquez-Rodríguez 2010, S. 3 f.]:

Es sei

$j$	der Index für einen Auftrag,
$s$	der Index für eine Stufe,
$l$	der Index für die $l^{te}$ Maschine auf einer Stufe,
$p_{js}$	der Bearbeitungszeit, die der Auftrag $j$ in Stufe $s$ benötigt,
$c_{js}$	der Fertigstellungszeitpunkt von Auftrag $j$ an Stufe $s$ ( $c_{j0} = 0$ ),
$r_j$	das früheste mögliche Startdatum des Auftrags $j$ ,
$C_j = c_{js}$	die benötigte Fertigungszeit von Auftrag $j$ an Produktionsstufe $s$ ,
$F_j$	die Durchlaufzeit des Auftrags $j$ , die sich aus $F_j = C_j - r_j$ ergibt,
$L_j$	die Verspätung des Auftrags $j$ , die sich aus $L_j = C_j - d_j$ ergibt,
$T_j$	die genormte Verspätung des Auftrags $j$ , die sich aus $T_j = \max\{L_j, 0\}$ ergibt,
$E_j$	die Earliness (Frühzeitigkeit) des Auftrags $j$ , die sich aus $E_j = \max\{d_j - C_j\}$ ergibt.

$$Y_{jst} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Auftrag } j \text{ auf Produktionsstufe } s \text{ der Maschine } l \text{ zugeordnet ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$X_{jrs} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Auftrag } j \text{ der Vorgänger von Auftrag } r \text{ auf Produktionsstufe } s \text{ ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und  $Q \geq \sum_j \sum_s M^{(s)} p_{js}$  eine beliebig große Zahl

Damit sei  $Z$  die Zielfunktion mit

$$\text{Min } Z \tag{3.1}$$

$$Z \geq c_{js}, \quad \forall j \tag{3.2}$$

$$\sum_{l=1}^{M^{(s)}} Y_{jst} = 1, \quad \forall (j, s) \tag{3.3}$$

$$c_{js} - c_{j,s-1} \geq \sum_{l=1}^{M^{(s)}} Y_{jst} p_{js}, \quad \forall (j, s) \tag{3.4}$$

$$Q(2 - Y_{jst} - Y_{qsl} - Y_{jq_s}) + c_{js} - c_{qk} \geq p_{js} \quad \forall (j, l, q, s), \text{ sodass } j < r \tag{3.5}$$

$$Q(3 - Y_{jst} - Y_{qsl} - Y_{jq_s}) + c_{qs} - c_{js} \geq p_{qs} \quad \forall (j, l, q, s), \text{ sodass } j < r \tag{3.6}$$

$$Y_{jst} \in \{0,1\}, \quad \forall(j, l, s) \quad (3.7)$$

$$X_{jrs} \in \{0,1\}, \quad \forall(j, q, s) \quad (3.8)$$

$$c_{js} \geq 0, \quad \forall(j, s) \quad (3.9)$$

Gemäß allgemeiner Notation wird dieses Problem auch formuliert als

$$FHS, ((PM^{(s)})_{m=1}^s) \parallel C_{max} \quad (3.10)$$

Ziel dieses Basisproblems ist die Minimierung der Durchlaufzeit, welches ein am meisten untersuchtes Ziel im Bereich der HFS-Probleme darstellt. Die Einschränkungen in (3.3) stellen sicher, dass jeweils nur ein Auftrag einer Maschine je Produktionsstufe zugewiesen wird. Die Startzeitrestriktion in (3.4) regelt dabei, dass die nachfolgende Stufe eines Auftrags nicht beginnen kann, wenn die Vorgängerstufe diesen Auftrag noch bearbeitet. Durch (3.5) und (3.6) wird gewährleistet, dass es zu keiner Überlappung von Aufträgen auf den Maschinen und Produktionsstufen kommt.

### 3.3.2 Lösungsverfahren HFS-basierter Problemstellungen

Praxisnahe HFS-Probleme können grundsätzlich zu den ganzzahligen kombinatorischen Optimierungsproblemen gezählt werden, die in der Regel *NP* hart sind. Die Lösungsverfahren dieser Problemklasse lassen sich in exakte und heuristische Verfahren einteilen [Schocke 2000, S. 31]. Obwohl eine optimale Lösungsfindung durch exakte Verfahren bei den in dieser Arbeit zu Grunde liegenden Problemen auszuschließen ist [Pinedo 2005, S. 413; Baker & Trietsch 2009, S. 241; Domschke et al. 2015, S. 135], erfolgt zunächst eine systematische Literaturliteraturanalyse eben dieser Methoden, bevor anschließend heuristische Verfahren im Mittelpunkt stehen sollen.

---

<sup>43</sup> mit *FHS* als Hybrid-Flow-Shop bestehend aus *s* Produktionsstufen;  $((PM^{(s)})_{m=1}^s)$ , also  $i=1, \dots, m$  identische, parallele Maschinen, wobei mit  $C_{max}$  die maximale Produktionsdurchlaufzeit aller Aufträge optimiert werden soll

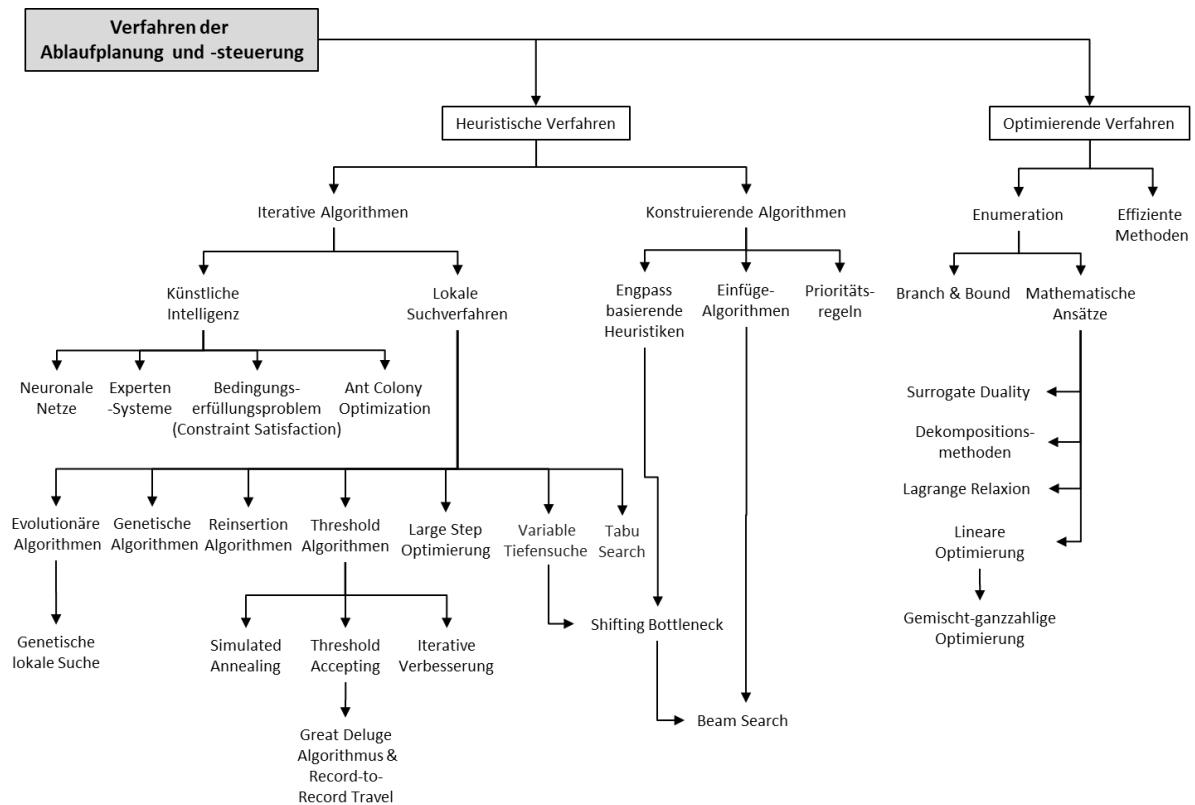


Abbildung 3.5: Ansätze zur Lösung von Scheduling Problemen, in Anlehnung an [Jain und Meeran 1998]

### Exakte Verfahren

Das Ziel exakter Verfahren liegt im Finden der optimalen Lösung. Aufgrund der gegebenen Komplexität von HFS-Problemen ist das Finden einer optimalen Lösung nur für sehr kleine Instanzen möglich. Mehrheitlich haben sich Verfahren auf Basis von Branch & Bound (verzweigen & begrenzen) aufgrund ihrer effizienten Lösungsraumerforschung durchgesetzt [Brucker 2007, S. 202 ff.; Pinedo 2014, S. 182 ff.]. Mit Hilfe einer Tiefen- und Breitensuche werden Zweige (disjunktive Graphen) untersucht, die zuvor durch obere und untere Schranken begrenzt werden. Dabei stellt die obere Schranke stets den bisher besten Zielfunktionswert dar. Zu den ersten Arbeiten können die Ansätze von Johnson und Salvador gezählt werden, wobei Johnson zusätzlich zu einem zweistufigen HFS mit Rüstzeiten operiert [Johnson 1954, S. 61 ff.]. Die Methode von Salvador ist prinzipiell auf ein beliebig großes Produktionssystem anwendbar und erzeugt einen Permutationsplan für das gesamte System (hierbei ist die Reihenfolge der Aufträge auf allen Stufen identisch) [Salvador, S. 83 ff.]. Viele Wissenschaftler haben sich seitdem mit den Möglichkeiten auseinandergesetzt, die das Branch & Bound Verfahren bietet. Einen guten Überblick dazu geben die Arbeiten von Wang, Quandt oder Kis und Pesch [Kis & Pesch, S. 196 ff.; Wang, S. 78 ff.; Linn & Zhang 1999, S. 57 ff.; Quandt 2004]. Eine umfassende Untersuchung durch Ribas et al. ergab, dass die besten bekannten Branch & Bound Verfahren eine effiziente Lösungsfindung nur bei maximal 5 Produktionsstufen und 15-20 Aufträgen gewährleisten können [Ribas et al. 2010, S. 1439 ff.]. Eine weitere Möglichkeit zur exakten Lösungsfindung von HFS-Problemen besteht durch den Einsatz von gemischt ganzzahligen Modellen, wobei die meisten Ansätze das Ziel der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit verfolgen. Die Arbeiten von Guinet et. al., Sawik oder Ruiz et. al. können als Beispiele dafür genannt werden [Guinet et al. 1996, S. 1399 ff.; Sawik 2007,

S. 39 ff.; Ruiz et al. 2008, S. 1151 ff.]. Mit seinem integrierten Lösungsansatz, welcher Losgrößen-, Belegungs- und Reihenfolgeprobleme involviert, stellt [Quadt 2004] eine Besonderheit dar. Er formuliert als Ziel die Minimierung von Lager-, Verzugs- und Rüstkosten sowie eine möglichst minimale durchschnittliche Produktionszeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass viele wissenschaftliche Ansätze zur optimalen Lösung von HFS-Problemen in den letzten Jahren verfasst worden sind. Dabei wurden sowohl kleinere als auch komplexe Problemstellungen untersucht. Für die Lösung praxisrelevanter Problemgrößen konnte bisher kein Verfahren gefunden werden.

### *Heuristische Verfahren*

Praxisnahe Lösungsansätze liegen oft im Fokus der Wissenschaft, wenn an heuristischen Ansätzen geforscht wird. Eine Vielzahl unterschiedlicher Arbeiten ist in den vergangenen Jahren dazu entstanden, die stetige Verbesserung der Rechnerleistungen eröffnet zusätzlich neue Möglichkeiten. Generell lassen sich heuristische Verfahren in Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren einteilen, wobei Schocke diese Einteilung weiter verfeinert [Schocke 2000, S. 33]. Genannt werden können:

- Eröffnungsverfahren
- Verbesserungsverfahren
- Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren
- Relaxationsorientierte Verfahren
- Kombinationsverfahren

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine dementsprechende Gliederung, wobei (aufgrund der Vielzahl von existierenden Arbeiten) stets ein Bezug zum betrachteten HFS-Problem gegeben ist.

Für die Erstellung eines ersten ausführbaren Plans werden oft *Eröffnungsverfahren* eingesetzt, die in einer überschaubaren Zeit eine Startlösung generieren können [Pinedo 2014, S. 376 ff.]. Vorausschauende Verfahren sind dabei jene, die vor der Fixierung einer Variablen die Auswirkungen abschätzen. Eine schrittweise Zusammensetzung lässt sich beispielsweise mit dem Greedy-Verfahren erzielen. Eine einfache Zuweisung von Aufträgen zu Ressourcen kann durch den Einsatz von Prioritätsregeln erfolgen. Dabei gibt der zugewiesene Rang eines Auftrags die Position in der organisatorischen Auftragsreihenfolge einer Maschine wieder [Bloech et al. 2014, S. 257]. Aufgrund der Einfachheit ihrer Anwendung wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Prioritätsregeln entwickelt und für komplexe Problemstellungen vorgeschlagen. Nach mehrheitlicher Meinung existiert zur Lösung eines HFS-Problems jedoch keine Universalregel, die durchgängig beste Ergebnisse generiert. Entscheidend ist die richtige Auswahl der Regel in Bezug auf die Art des Problems sowie der zu erreichenden Zielsetzung [Rajendran & Holthaus 1999, S. 156 ff.]. Eine Einteilung kann dabei in statisch und dynamisch erfolgen. Während statische Regeln sich entlang der Zeitachse nicht verändern, kommt es bei dynamischen Prioritätsregeln zu mehrmaligen Neuberechnungen. Eine weitere Klassifizierung kann in lokal und global erfolgen, wobei erstere nur anhand von lokalen Informationen agieren, während globale Regeln das gesamte Produktionssystem als Basis für die Berechnung nutzen [Daub 1994, S. 139 ff.]. Diverse Arbeiten, die sich mit dem Problem eines Hybrid-Flow-Shops befassen, setzen zur Lösung Prioritätsregeln ein. Praxisbezogene Beispiele finden sich in den Arbeiten von [Alvarez-Valdes et al. 2005, S. 525 ff.], die ein Problem der Glasherstellung betrachten, [Voss & Witt 2007, S. 445 ff.], die auf eine Problematik der Stahlindustrie eingehen oder [Adler et al. 1993, S. 641 ff.], der ein komplexes Problem in der Verpackungsindustrie löst. Zur weiterführenden Literatur sei auf die Arbeiten von [Panwalkar & Iskander 1977, S. 45 ff.] [Blackstone et al. 1982, S. 27 ff.], [Haupt 1989, S. 3 ff.] und [Neidhardt 2007] verwiesen, die einen guten gesamtheitlichen Überblick geben. Neben den



beschriebenen einfachen Prioritätsregeln kommen auch komplexere, konstruktive Algorithmen zur Lösung HFS-basierter Problemstellungen zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch eine hohe Schnelligkeit der Verfahren aus, wenngleich der Einsatz sehr problemspezifisch erfolgt. Daraus ableitend ist festzustellen, dass Prioritätsregeln als ein einfaches und starkes Werkzeug ihre Verwendung in vielen praxisbezogenen Entscheidungssystemen finden, wenngleich „eine so erzielte Lösung (..) abstrakt und mitunter relativ weit von den tatsächlichen Gegebenheiten entfernt“ ist [Gondek 2011, S. 27].

Heuristische Verbesserungsverfahren, die auch als Iterationsverfahren bezeichnet werden, nutzen eine gegebene Ausgangslösung, um diese schrittweise zu verbessern. Komplexe Problemstellungen werden damit lösbar, auch wenn ein Optimum selten erreicht wird. Beginnend mit einer Suche in der Nachbarschaft der existierenden Ausgangslösung wird eine Alternative identifiziert, anschließend bewertet und auf Akzeptanz geprüft. Gemäß den eingesetzten Strategien können die Verfahren in reine Verbesserungsverfahren, lokale Suchverfahren und Metaheuristiken unterteilt werden.

---

**start**

Initialisiere Steuerparameter

Eröffnungsverfahren: Erzeuge eine Ausgangsalternative  $x$

**wiederhole**

Erzeuge eine neue Alternative  $x' \in N(x)$

Evaluieren  $x'$

Prüfe  $x'$  auf Akzeptanz

Aktualisiere die Steuerparameter

**bis** Abbruchkriterium erfüllt

---

Abbildung 3.6: Algorithmus zum allgemeinen Ablauf von Verbesserungsverfahren [Pinedo 2005, S. 424]

Zu den besten heuristischen Verfahren im Bereich des Scheduling wird das Shifting-Bottleneck Verfahren gezählt, welches erstmals von Adams et al 1988 vorgestellt wurde [Adams et al. 1988, S. 391 ff.]. Das komplexe Produktionssystem wird dabei in Einmaschinen-Probleme zerlegt, um diese anschließend möglichst optimal lösen zu können. Die Gesamtlösung setzt sich somit aus vielen erzeugten Teillösungen zusammen. Selektiert wird immer die Bottleneck-Maschine, also diejenige, die den größten Einfluss auf die Gesamtzykluszeit besitzt. Das Verfahren geht iterativ vor, wobei getroffene Entscheidungen als fixiert angesehen werden. Es endet, wenn alle Maschinen eingeplant sind [Domschke 1997, S. 44 ff.]. Ursprünglich zur Lösung des Problems  $J_m \parallel C_{\max}$  entwickelt, basiert die eingesetzte Methode jedoch auf einer wiederholten optimalen Lösung des Typs  $1|r_j|L_{\max}$  [Pinedo 2016, S. 195 f.]. Damit ist, neben dem enormen Parametrisierungsaufwand, ein hoher Rechenaufwand verbunden. Reine Verbesserungsverfahren akzeptieren ausschließlich Nachbarn mit verbesserten Zielfunktionswerten und enden somit in einem lokalen Optimum [Domschke 1997, S. 47]. Es besteht die Möglichkeit, direkt die erste verbesserte Lösung zu akzeptieren (first fit), oder durch die Erstellung aller Nachbarschaftsalternativen eine Liste zu erzeugen, aus der die beste Alternative ausgewählt wird (best fit). Lokale Suchverfahren können hingegen durch die Akzeptanz einer verschlechterten Lösung ein lokales Optimum wieder verlassen. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit relativ hoch, sich dem gleichen lokalen Optimum im weiteren Verlauf durchgeführter Züge erneut zu nähern. Kochhar und Morris führen in Ihrem Ansatz zum Problem  $FH_m, ((PM^{(k)})_{k=1}^m) \parallel \sum C_j$  eine zweistufige Dekomposition durch, wobei das erste der entstehenden Teilprobleme durch lokale Suchverfahren gelöst wird [Kochhar & Morris 1987b, S. 299 ff.]. Gemäß Glover und Laguna wird durch den Begriff der

Metaheuristik eine Masterstrategie verstanden, die leitend auf andere Heuristiken einwirkt und diese entsprechend verändert, damit lokale Optima überwunden werden können [Glover & Laguna 1997]. Zum Einsatz können sowohl einfache Strategien der Nachbarschaftssuche als auch komplexe Verfahren kommen. Damit gehören Metaheuristiken zu den problemspezifischen bzw. generischen Verfahren mit einer dementsprechenden Anwendungsmöglichkeit auf verschiedenste Problemstellungen [Nickel et al. 2011, S. 230], vgl. Abbildung 3.7.

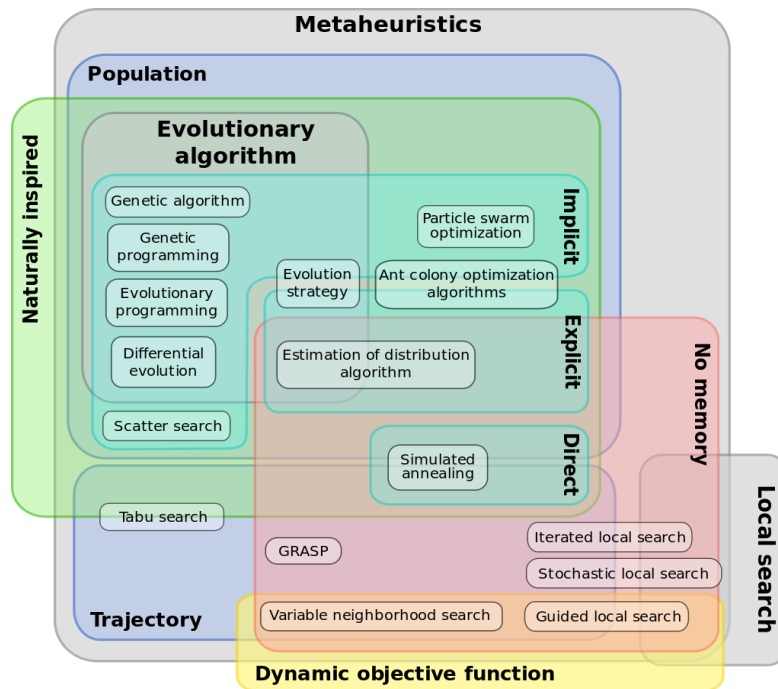


Abbildung 3.7: Einordnung bekannter Metaheuristiken [Dréo 2011]

Im Folgenden werden einige wichtige Metaheuristiken näher erläutert, wobei ihr Einsatz zur Lösung von HFS-Problemen im Mittelpunkt stehen soll. Als grundlegende Literatur sei zudem verwiesen auf [Dréo 2010; Gendreau 2010; Burke & Kendall 2014]. Verschiedenen Studien der Literatur ist zu entnehmen, dass in Bezug auf die Güte der Lösung von ablaufplanungsspezifischen Problemen, zu denen auch HFS-Probleme als eine der komplexesten Varianten zählen, die Verfahren des Simulated Annealing und Tabu Search Vorteile gegenüber genetischen Algorithmen aufweisen. So benötigen genetische Algorithmen tendenziell mehr Zeit, um gute bis sehr gute Lösungen zu finden [Józefowska et al. 1998, S. 354 ff.; Youssef et al. 2001, S. 167 ff.]. Als ursprüngliche Herkunft des Simulated Annealing (SA) gilt das thermodynamische Verhalten von Abkühlvorgängen bei Festkörpern, welches erstmals 1983 von [Kirkpatrick et al. 1983, S. 671 ff.] vorgestellt wurde. Hierbei tritt die Anordnung der Atome in einer vollkommen geordneten Kristallstruktur mit einem Zustand minimaler Energie ein, wozu eine geeignete Abkühlgeschwindigkeit benötigt wird. Grundsätzlich erfolgt die Suche in der Nachbarschaft des Ausgangsproblems, wobei auch schlechtere Lösungen mit einer Akzeptanzwahrscheinlichkeit  $A$  in Betracht gezogen werden können. Basis dieser Berechnung ist die Boltzmann-Verteilung, die aus den Parametern  $P$  (Wahrscheinlichkeit),  $E$  (Energie),  $t$  (Temperatur) und  $k$  (Boltzmann-Konstante) wie folgt zusammengesetzt wird:

$$P(E) = e^{\frac{-E}{k \cdot t}} \quad (3.11)$$

Durch den Austausch des Parameters  $E$  (Energie) mit einer Kostenfunktion wird die Übertragung auf ein Optimierungsproblem vollzogen. Dabei haben die eingesetzten Steuerungsparameter einen direkten Einfluss auf das Verfahren, ein genormtes Regelwerk für die Einstellung oder Vorgehensweise bei der Anwendung des SA existiert nicht. Zur Akzeptanzwahrscheinlichkeit  $A_{ij}(t_k)$  erfolgt auch die Ermittlung einer Generierungswahrscheinlichkeit  $G_{ij}$ .

Daraus ergibt sich die Übergangswahrscheinlichkeit der Lösungen  $i$  und  $j$ :

$$P_{ij}(t_k) = G_{ij} * A_{ij}(t_k) \quad (3.12)$$

Schlussfolgernd hat ausschließlich die (letzte) existierende Lösung einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der folgenden Lösung. Als einer der ersten Arbeiten zur Lösung von HFS-Problemen versuchen [Osman & Potts 1989, S. 551 f.] bereits 1989, unter Nutzung eines Permutationsplans als Ausgangslösung, vier unterschiedliche Möglichkeiten einer Nachbarschaftssuche zu entwickeln. Sie stellen dabei fest, dass insert-Züge bessere Ergebnisse liefern als swap-Züge. Die Erstellung eines guten Ausgangsplans sowie eine neue Möglichkeit der Bestimmung der Akzeptanzwahrscheinlichkeit untersuchen [Ogbu & Smith 1990, S. 243 ff.; Ogbu & Smith 1991, S. 64 ff.]. [Ishibuchi et al. 1995, S. 388 ff.] verfolgen das Ziel der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit und stellen dazu zwei Algorithmen vor. Riane wendet SA hingegen nur auf der ersten Produktionsstufe an, wobei er auch Rüstzeiten involviert [Riane 1998]. Verschiedene parallele Maschinen auf den Produktionsstufen sowie Rüstzeiten stehen auch im Fokus von [Low 2005, S. 2013 ff.], der ein Verfahren zur Erzeugung minimaler Durchlaufzeiten entwickelt. [Tabriz et al. 2009, S. 1943 ff.] beschreiben schließlich ein Verfahren zur Lösung eines HFS-Produktionssystems, das durch identische parallele Maschinen sowie reihenfolgeabhängige Rüstzeiten charakterisiert wird. Hierzu findet das SA Verfahren Anwendung auf der ersten Stufe. Das NP schwere Problem  $HFSm | s_j, k | C_{max}$  ist Kern der Arbeit von Mirsanei et al., die einen Simulated Annealing Ansatz beschreiben, der auf zwei Veränderungsstrategien beruht. Durch die Implementierung unterschiedlicher Auftragsvertauschungen wird versucht, zu besseren Ergebnissen zu gelangen (als ein zum Vergleich verwendeter genetischer Algorithmus), was auch gelingt [Mirsanei et al. 2011b, S. 965 ff.]. Abschließend sei verwiesen auf die Arbeiten von [Aurich et al. 2016a, S. 95 ff.; Aurich et al. 2016b], die anhand von realen Produktionsdaten versuchen, sowohl eine Minimierung des Makespan als auch der totalen Verzögerung zu erzielen. Dazu werden zwei metaheuristische und ein heuristischer Ansatz vorgestellt, um das zweistufige Problem  $HFS2(P_4, P_5) | s_g, h | C_{max}, \sum T_j$  zu lösen. Es bestehen zusätzlich familiär bedingte haupt- und nebenreihenfolgeabhängige Rüstzeiten. Ansatzpunkt zur Lösungsfindung ist die Trennung von Sequenzierung und Allokation auf den einzelnen Stufen. Während das Sequenzierungsproblem heuristisch gelöst wird, wurden für den Allokationsteil SA und Tabu Search Verfahren sowie eine Heuristik eingesetzt. Unter Verwendung der SA und Tabu Search Verfahren konnten leicht bessere Ergebnisse bezüglich der Gesamtverzögerung nachgewiesen werden, wobei die Heuristik bessere Makespan-Ergebnisse erzielte.

Entgegen des gedächtnislosen Vorgehens des SA bezieht Tabu Search (TS) als lokales Verfahren auf Basis der Nachbarschaftssuche vergangene Ergebnisse bei der Lösungsfindung mit ein. Dafür wird eine Tabu-Liste erzeugt, in der die Speicherung und vorübergehende Sperrung des letzten Zuges erfolgt. Gemäß dem Prinzip der größten Verbesserung bzw. kleinsten Verschlechterung geht das Verfahren iterativ vor. Die Sperrung des letzten Zuges lässt dabei lokale Optima überwinden. Mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit befasst sich [Taillard 1990, S. 65 ff.], der mit Hilfe von Tabu Search einen Permutationsplan generiert. Dabei findet der Nachweis statt, dass die entwickelten Verfahren bessere Lösungen präsentieren als einfache Eröffnungsverfahren. Durch den Einsatz einer Kombination aus Diversifikation und Intensivierung generieren [Ben-Daya & Al-Fawzan 1998, S. 88 ff.]

ein Verfahren zur besseren Auswahl des Nachbarn und weiterer Kandidaten. Auch Nowicki und Smutnicki entwickeln ein Verfahren für einen Hybrid-Flow-Shop, bei dem Sie identische parallele Maschinen annehmen. Dabei wird eine kurzfristige Tabu-Liste eingesetzt, um Zyklen auszuschließen, sowie eine längerfristige Liste, um eine Rückkehr zu bereits gefundenen guten Lösungen sicherzustellen [Nowicki & Smutnicki 1998, S. 226 ff.]. Begrenzte Puffer sowie reihenfolgeabhängige Rüstzeiten finden Beachtung im Ansatz von [Norman 1999, 163 ff.], der die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit verfolgt. Zusätzlich zu den begrenzten Puffern involvieren [Wardono & Fathi 2004, S. 380ff.] identische, parallele Maschinen auf den einzelnen Stufen. Dabei kommt es zur Blockade einer Maschine, wenn der produzierte Auftrag aufgrund mangelnder Pufferkapazität nicht abfließen kann. Schließlich kommt das Tabu Search Verfahren bei [Kulcsár et al. 2007, S. 127 ff.] zur Lösung von Neu- und Änderungsplanungsproblemen zur Anwendung. Die multikriterielle Zielfunktion umfasst dabei neben der maximalen Verspätung auch Rüstvorgänge, die maximale Fertigungszeit sowie die Anzahl verspäteter Aufträge.

Inspiziert durch die Vorgänge der Evolution werden genetische Algorithmen (GA), die erstmals von [Holland 1975] erwähnt werden, zur Lösung komplexer Probleme eingesetzt. Strategie ist dabei die kontinuierliche Veränderung und Weitergabe von Eigenschaften an die nächste Generation. Genetische Algorithmen arbeiten populationsbasiert und stochastisch und unterscheiden sich somit von den in der Nachbarschaft suchenden Verfahren Tabu Search und Simulated Annealing fundamental. Eine Vielzahl von Arbeiten, die genetische Algorithmen verwenden, beschäftigen sich mit der Lösung von HFS-Problemen. Wie bereits erwähnt, benötigen genetische Algorithmen nachweislich mehr Zeit als Verfahren des SA und TS, um gute Lösungen für komplexe HFS-Probleme zu finden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht weiter auf die beschriebenen GA-basierten Ansätze eingegangen, aber auf die entsprechende Literatur [Cheng et al. 1995, S. 513 ff.; Reeves 1995, S. 5 ff.; Kurz & Askin 2004, S. 66 ff.; Serifoğlu & Ulusoy 2004, S. 504 ff.; Quadt & Kuhn 2007, S. 686 ff.] verwiesen. Bereits 1956 wurde der Begriff der Künstlichen Intelligenz (KI) geprägt, welcher „einerseits ein Ziel, auf das erst hingearbeitet wird, und andererseits die Gesamtheit der Forschungs- und Entwicklungs-vorhaben, die zu diesem Ziel hinführen sollen“ [Sesink 1993, S. 8] beschreibt.

Ein Teilgebiet der KI umfasst dabei die Methoden des Maschinellen Lernens (ML). Das Reinforcement Learning (RL) (oder bestärkendes Lernen) als Teil des ML gehört zu den aktuell bedeutungsvollsten Forschungsschwerpunkten im Bereich der KI und wird vornehmlich zur Lösung von sequenziellen Entscheidungsproblemen eingesetzt. Dabei interagiert ein Agent mit seiner Umgebung und lernt durch „Versuch und Irrtum“ (trial and error), in Verbindung mit einer Rückkopplung durch das System, bessere Zustände und Lösungen zu entdecken, vgl. Abbildung 3.8.

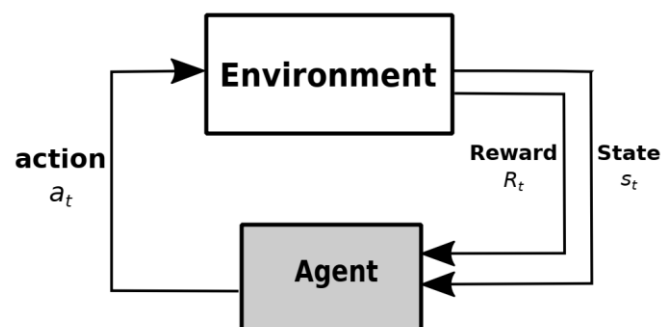


Abbildung 3.8: Reinforcement Learning, Agent und Umgebung [Amiri et al. 2018]

Als eine der ersten Arbeiten zur Lösung von HFS-Problemen mittels Methoden des ML kann die Untersuchung von [Wei et al. 2019] angesehen werden, die RL nutzt, um die Terminplanung einer Motorenfabrik bzw. die Ausfahrtreihenfolge von Flugzeugen kontinuierlich zu verbessern. Wei et al. vergleichen Ihre Ergebnisse, die mit dem Einsatz des Q-Learning Algorithmus [Watkins & Dayan 1992] generiert werden, anschließend mit einfachen Prioritätsregeln und weisen nach, dass ein Einsatz der Methoden des RL bei komplexen HFS-Problemen zu guten Ergebnissen führen kann. Zacharias et al. entwickeln einen ML-basierten Ansatz zur Minimierung des Makespan und der Durchlaufzeit, welcher unabhängig bezüglich der Anzahl von (heterogenen) Maschinen je Stufe sowie Stufenanzahl agiert [Zacharias et al. 2019]. Mit Hilfe des Trainings von Neuronalen Netzen (NN) sowie Support Vector Machines (SVM) mit Lösungen optimaler Maschinenzuordnungen (unterschiedlicher Losgrößen und zufällig generierter Verarbeitungszeiten) soll der Planungsprozess beschleunigt werden. Die erzielten Ergebnisse werden von den Autoren als vielversprechend angesehen, wenngleich die bisherigen Resultate ausschließlich auf künstlich erzeugten Ausgangsdaten beruhen. Kuhnle et al. verwenden in Ihrer Arbeit RL, um die adaptive Auftragsabfertigung in Job-Shop-Fertigungssystemen zu verbessern [Kuhnle et al. 2019]. Sie implementieren ihren methodischen Ansatz mit Hilfe der Python Bibliotheken SimPy (Simulation) und TensorForce (RL) und stellen fest, dass der gewählte RL-Algorithmus neben einer guten Lernleistung auch die untersuchten Zielgrößen verbessert, die teilweise konkurrierend sind. Die Leistungsfähigkeit des Ansatzes wird zusätzlich durch den Vergleich mit Ergebnissen ausgewählter Prioritätsregeln belegt. Einen neuen Ansatz zu Lösung eines zweistufigen HFS-Problems mit familienbasierten Rüstzeiten präsentieren [Lang et al. 2020]. Dazu nutzen sie den genetischen NEAT-Algorithmus (**N**euro**E**volution of **A**ugmented **T**opologies), der beliebig viele neuronale Netze erzeugt, um Jobsequenzen zu bewerten und das aus einem realen industriellen Anwendungsfall stammende Problem zu lösen. Der NEAT-Algorithmus interagiert dabei mit einem ereignisdiskreten Modell, welches die verschiedenen Netzwerkkonfigurationen auswertet und Trainingssignale generiert. Ein anschließender Vergleich der Ergebnisse mit derzeitig genutzten Verfahren zeigt das Potential dieses Ansatzes. Für die Lösung des betrachteten Problems (generiert aus Testdaten) werden nur 0,1 – 0,2 Sekunden benötigt, welches die Echtzeitfähigkeit unterstreicht. Da die Laufzeit in Bezug auf die Problemkomplexität einen linearen Charakter aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass auch praxisnahe Problemgrößen in der benötigten Zeit gelöst werden können. Zukünftig geplante Experimente sollen dies belegen. Die Qualität der bisher erzielten Ergebnisse lässt sich mit der aktuell eingesetzter Metaheuristiken (z. B. Tabu Search oder Simulated Annealing) vergleichen, wenngleich auch dieser neue Ansatz bei den durchgeführten Experimenten (zu vermeidende) Terminverspätungen von Aufträgen nicht gänzlich verhindern kann [Lang et al. 2020, S. 1306]. Grundsätzlich bietet der Einsatz von Methoden des Maschinellen Lernens viele Potentiale, komplexe, sich permanent ändernde Problemstellungen, in Echtzeit zu lösen. Somit werden viele Anforderungen der zur Lösung dieser Arbeit zu Grunde liegenden Problemstellung erfüllt. Dem gegenüber steht die (bisher noch) sehr geringe Anzahl von KI-basierten Arbeiten zur Lösung von komplexen Job-Shop- bzw. Flow-Shop-Problemen, die zudem größtenteils mit praxisfernen, theoretisch erzeugten Daten agieren. So weisen etwa [Lang et al. 2020] nach, dass der genetische NEAT-Algorithmus bei den vier verwendeten Datensätzen gute Ergebnisse erzielt, ein fundierter Rückschluss auf die Lösungsqualität mit anderen (andersartigen oder komplexeren) Daten ist jedoch nicht möglich. Dazu müssten die durch den NEAT Algorithmus generierten Netze unter Beweis stellen, dass sie auch für neue, realitätsnahe Datensätze, welche statistisch signifikant abweichen, eine entsprechende Lösungsgüte darstellen. Neben der oft noch ausstehenden Erprobung ist die fehlende Transparenz der durch die neuronalen Netze getroffenen Scheduling-Entscheidungen (im Blackbox-Verfahren) als problematisch anzusehen. So wird der verantwortliche Fertigungsplaner beispielsweise nicht nachvollziehen können, warum der eingesetzte Algorithmus einem Auftrag eine bestimmte Priorität zuweist, was die Akzeptanz deutlich verringert (dieses wird verstärkt, wenn das neuronale Netz Fehlentscheidungen trifft, deren Ursachen

nicht analysiert werden können). Schoonhoven et al. sehen die folgenden Gesichtspunkte bei der Umsetzung von KI-gestützten Prozessen in Unternehmen als kritisch an [Schoonhoven et al. 2019]. Demnach können

- Unternehmenskulturen, die keine datengeschützten Entscheidungen unterstützen,
- fehlendes Vertrauen zu neuen Methoden,
- zu hohe oder zu geringe Erwartungen an die KI,
- eine geringe Datenqualität und -menge,
- nicht gekennzeichnete Daten,
- mangelnde Fähigkeiten der Mitarbeiter sowie
- oft nicht nachvollziehbare Ergebnisse

als Hindernisgründe angesehen werden, die eine erfolgreiche Implementierung in praxisnahe Umgebungen erschwert. Das große Potential einer Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz in Unternehmen steht dem gegenüber und wird sich nach Meinung des Autors schlussendlich durchsetzen und weiter etablieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Methoden der KI – insbesondere die vielversprechenden Potentiale des Reinforcement Learning aufgrund der derzeit (noch) existierenden Nachteile nicht weiterverfolgt, wenngleich der modulare Ansatz des entwickelten Konzepts eine spätere Integration dieser (und weiterer) Methoden erlaubt.

### 3.3.3 Simulationsbasierte Optimierung

In der Praxis vorliegende Problemstellungen im Bereich der Produktionssteuerung sind mehrheitlich *NP*-hart und damit nicht exakt durch eine mathematische Formel abbildbar. Domschke verweist darauf, dass gerade für die am schwierigsten zu lösende Klasse von Problemen simulationsgestützte heuristische Optimierungsverfahren eine wertvolle Option darstellen [Domschke 1997, S. 51 ff.]. Dazu stellen [März et al. 2011, S. 5] jedoch fest, dass der erwiesene Nutzen des Einsatzes einer simulationsgestützten Optimierung in der Planung von produktionslogistischen Aufgaben nur unzureichend in der Praxis aufgegriffen wird. Fehlende Kenntnisse über Potentiale und unzureichende Erfahrungen sowie eine schlechte Datenqualität machen sie dafür verantwortlich. Im folgenden Abschnitt sollen zunächst die verschiedenen Simulationsparadigmen kurz erläutert und für den Einsatz zur Lösung der vorliegenden Problemstellung bewertet werden. Anschließend werden Ansätze der Kopplung von Simulation und heuristischen Optimierungsalgorithmen vorgestellt, die in ihrer Grundidee vielversprechend zur Lösung des Ausgangsproblems erscheinen.

#### *Simulationsparadigmen*

Nach VDI bedeutet Simulation „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [VDI-3633, S. 1]. Weiterführend wird unter Simulation auch „das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden“ [VDI-3633, 1- 3, S. 2]. Für Nyhuis und Wiendahl steht die Simulation für eine „weit verbreitete Technik zur Erforschung, Auslegung und Optimierung komplexer Systeme“ [Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 49]. Demnach dient die Simulation zur Leistungsbewertung eines Systems, wobei die Schlüsse, die durch das Simulationsmodell gewonnen werden, auf das reale System übertragbar sein sollten [März et al. 2011, S. 13]. Verfolgte Absichten einer simulationsbasierten Untersuchung können nach [Page et al. 1988, S. 2; Kuhn et al. 1993, S. 2; Wenzel 1998, S. 1]:

- eine Optimierung bzw. Verbesserung des Systemverhaltens,
- rechnerunterstützte Entscheidungshilfen,
- eine Überprüfung bestehender Theorien,
- die systemseitige Validierung oder
- eine Beleuchtung komplexer Zusammenhänge zur Steigerung des Systemverständnisses sein.

Für die Nachbildung eines realen Systems (z. B. eines Produktionssystems) werden Modelle verwendet, die ein Abbild darstellen und oft abstrahiert sind. Ziel ist es, wesentliche Merkmale der Realität im Modell beizubehalten. Simulationsmodelle sind algorithmische Modelle, die auch zu den mathematischen Modellen gezählt werden. Dabei ist „das mathematische Modell eines realen Systems oder Prozesses (..) eine Gesamtheit formaler Beziehungen, die den Zusammenhang der Zustandsvariablen mit anderen Systemparametern, den Anfangsbedingungen und Eingangsgrößen des Systems oder Prozesses beschreibt.“ [Frank & Lorenz 1979, S. 29]. Mit Hilfe dieser Modelle lassen sich nun Simulationsexperimente durchführen, um Informationen zu sammeln, die Reaktion eines Systems auf ein bestimmtes Ereignis zu testen oder die Entwicklung eines Systems unter bestimmten Bedingungen im Zeitverlauf nachzuahmen [Borshchev & Filippov 2004, S. 1]. Verschiedene Simulationsansätze kommen bei der Durchführung von Simulationsstudien zum Einsatz, wobei die ereignisdiskrete Simulation im Kontext der Produktion aufgrund ihrer Eigenschaften überproportional häufig Verwendung findet. Neben ereignisdiskreten haben sich kontinuierlich/ flussorientierte sowie ereignisdiskret/ flussratenbasierte Ansätze entwickelt. Der rein objektorientierte Simulationsansatz der **ereignisdiskreten Simulation**<sup>44</sup> wurde bereits 1961 vorgestellt [Gordon 1961]. Grundprinzip ist dabei die Transformation der Elemente eines Ausgangssystems in aktive (z. B. Aufträge, die sich durch das Modell bewegen) und passive (z. B. Ressourcen, die Aufträge verarbeiten) Objekte. Der Status des Systems ändert sich zu diskreten Zeitpunkten, die mit bestimmten Ereignissen während der Simulation verbunden sind.<sup>45</sup> Anschließend erfolgt die Aktualisierung aller Elemente bezüglich ihres Status sowie der zugeordneten Variablen, vgl. Abbildung 3.9.

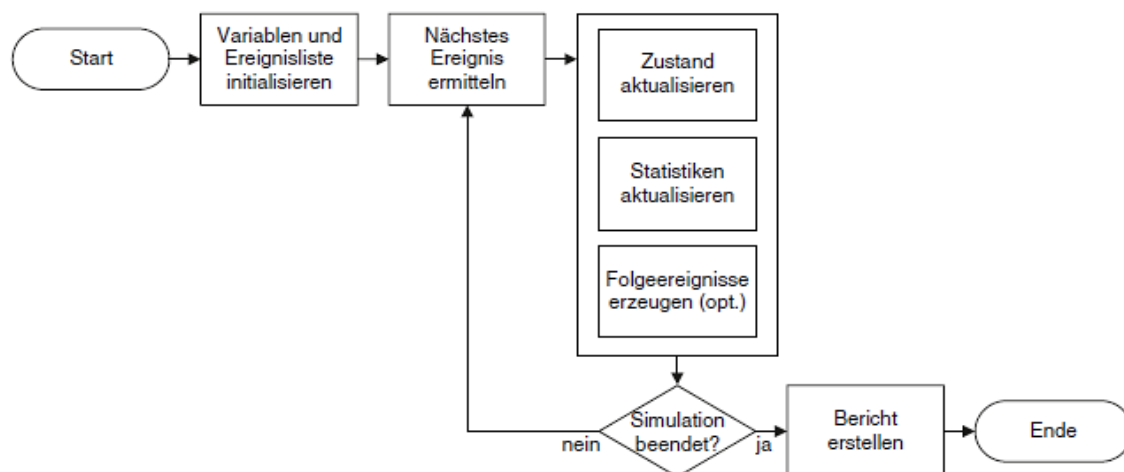


Abbildung 3.9: Schematischer Ablauf einer ereignisdiskreten Simulation [März et al. 2011, S. 16]

<sup>44</sup> Häufig finden sich zum Begriff der ereignisdiskreten Simulation in der Literatur auch die Bezeichnungen „diskret ereignisgesteuerte Simulation“, „diskret ereignisorientierte Simulation“ oder „Discrete Event Simulation“, kurz „DES“ oder „DE“.

<sup>45</sup> Reggelin fasst diesen Sachverhalt folgendermaßen zusammen: „Charakteristisch für ereignisdiskrete Modelle ist, dass sich der Systemzustand nur zu den Zeitpunkten ändert, an denen Ereignisse auftreten. Ereignisse sind mit Orts- oder Zustandsänderungen der abgebildeten Flussobjekte verbunden.“ Reggelin [2011, S. 23].

Aufgrund der Abbildbarkeit einzelner Objekte lassen sich nahezu alle Systeme exakt modellieren. Durch den hohen Detaillierungsgrad ist dies jedoch oft nur mit großem Aufwand möglich. Zusätzlich können enorme Rechenzeiten entstehen, da eine erhebliche Anzahl von Flussobjekten vorliegen kann [Reggelin 2011, S. 22].

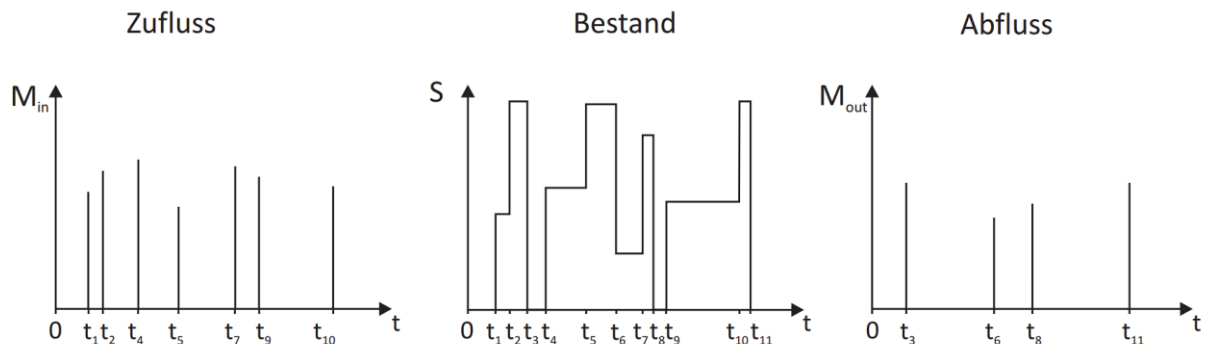


Abbildung 3.10: Zustandsveränderungen eines ereignisdiskreten Prozessmodells  
[Reggelin 2011, S. 56]

Grundsätzlich ist es möglich (und oft in der Literatur nachgewiesen), mit Hilfe einer Kopplung von ereignisdiskreten Modellen und heuristischen Optimierungsalgorithmen zu einer Lösung, auch für komplexe Problemstellungen wie der vorliegenden, zu gelangen. Heuristische Optimierungsmethoden durchlaufen zur Überprüfung und Lokalisierung möglicher Lösungsalternativen das Simulationsmodell gewöhnlich sehr oft, was aufgrund des hohen Detaillierungsgrads zu extrem langen und damit unzureichenden Rechenzeiten führen kann. Dieser Sachverhalt wird von [Aurich 2017, S. 41 f.] veranschaulicht, indem er ein einfaches System mit einem Puffer, einer Ressource sowie 100 Aufträgen (jeweils bestehend aus 500 Stück) simuliert. Bei einer Dauer von ca. 32 Sekunden je Simulationslauf und nur 5.000 zu überprüfenden Alternativen kommt er auf eine benötigte Zeit von ca. 44 Stunden. Eine schnelle Reaktion auf feinplanungsrelevante Sachverhalte oder gar eine umfassende, zeitnahe Steuerung ist somit ausgeschlossen. Aus diesem Grund erfolgt bei ereignisdiskreten Simulationsmodellen oft eine Aggregation der einzelnen Auftrags Elemente zu einem Objekt. Der Auftrag wird somit als Ganzes betrachtet, wobei sich die Bearbeitungszeiten auf den jeweiligen Maschinen durch die Multiplikation von Auftragsstückzahl und Bearbeitungsdauer je Objekt ergeben. Die Aggregation führt jedoch zu Informationsverlusten auf Objektebene und ist damit (besonders für praxisnahe) Problemstellungen nicht unbegrenzt einsetzbar. Wird ein Auftrag beispielsweise auf einer Maschine bearbeitet, so wäre es durchaus möglich, bereits bearbeitete Objekte der nächsten Produktionsstufe zuzuführen, ein sog. Auftragsplitting entsteht. Dieses in der Praxis häufig vorkommende Szenario ist, genau wie eine gleichzeitige Bearbeitung unterschiedlicher Produkttypen auf einer Maschine, durch die Aggregation von Aufträgen während der ereignisdiskreten Simulation nicht abbildbar.

Das Konzept des **System-Dynamics (SD)** wird bereits 1968 unter dem Namen des „Industrial Dynamic“ mit dem Ziel beschrieben, Abhängigkeiten zwischen Entscheidungen und deren Informationsfluss in einem System zu modellieren, diese zu berücksichtigen und geeignete Rückkopplungsschleifen im zeitlichen Verlauf darzustellen [Forrester 1968, S. 398 ff.; Borshchev & Filippov 2004, S. 4]. Grundsätzlich werden mit dem System-Dynamics Ansatz Modelle generiert, die sich durch dynamische Änderungen sowie ein kontinuierliches Verhalten im Zeitverlauf charakterisieren lassen, vgl. Abbildung 3.11. Dazu erfolgt eine fortlaufende Neuberechnung der Zustandsvariablen in genügend kleinen, konstanten Zeitschritten, um einen kontinuierlichen Flussprozess abzubilden [Reggelin 2011, S. 57].



Eine Abstrahierung der einzelnen Elemente des Modells wird erreicht, indem eine Darstellung als Bestände, Flüsse zwischen den Beständen sowie Informationen über Flussraten gewählt wird.

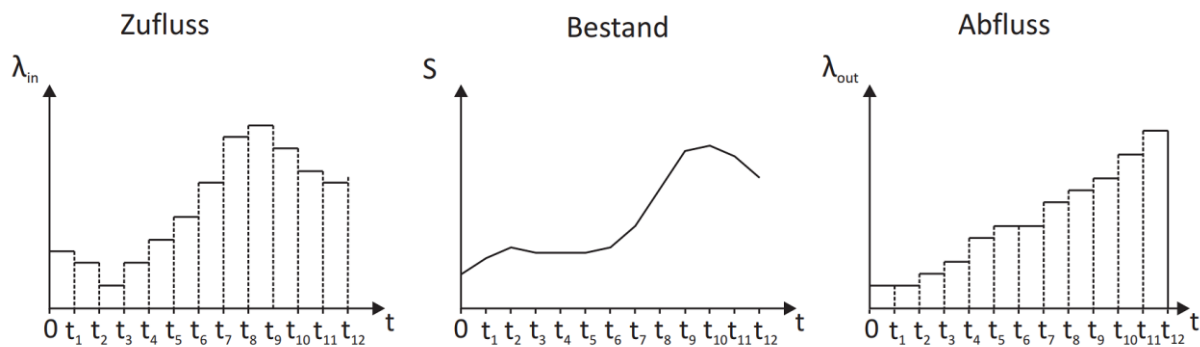


Abbildung 3.11: Zustandsveränderungen eines System-Dynamics Prozessmodells  
[Reggelin 2011, S. 57]

Auf den Einsatz von System-Dynamics Modellen bei der Durchführung von globalen Marktanalysen verweist [Lyneis 2000, S. 3], bei denen komplexe soziale sowie makroökonomische Phänomene berücksichtigt werden müssen, um entsprechende Prognosen daraus ableiten zu können. Zusammenfassend ist festzustellen, dass SD-Modelle aufgrund der aggregierten Vorgehensweise eher für strategische Aufgabenstellungen konzipiert sind, ein Einsatz zur Lösung operativer Entscheidungsprozesse dagegen als nicht sinnvoll erscheint [Reggelin & Tolujew 2011, S. 1508 ff.]. Zur Lösung der vorliegenden Problemstellung ist die Verwendung des Dynamic-Systems Ansatzes folglich ausgeschlossen.

Durch eine Kombination von Eigenschaften der bisher vorgestellten (DES und SD) Simulationsansätze entsteht ein hybrider Ansatz, der sowohl ereignisdiskret als auch flussratenbasiert vorgeht und als **Discrete-Rate-Simulation (DR)** bezeichnet wird [Damiron & Nastasi 2008, S. 740 ff.]. Neben der Darstellung von Prozessen als Flüsse (mit entsprechenden Flussraten) erfolgt die Berechnung der Zustandsvariablen zu diskreten Ereignissen. Eine Flussrate ändert sich somit nur beim Eintreten eines diskreten Ereignisses und bleibt zwischenzeitlich konstant. Ein stückweises, lineares Bestandsverhalten, welches aufgrund der gegebenen Linearität vorausberechnet werden kann, ermöglicht eine Planung von zuvor festgelegten Zuständen in Form von Ereignissen [Reggelin 2011, S. 29]. Abbildung 3.12 zeigt einen kontinuierlichen Materialfluss während einer bestimmten Zeitspanne. Da die Zufluss- und Abflussraten ( $\lambda_{in}$  und  $\lambda_{out}$ ) während dieser bestimmten Zeitspanne ihre Werte konstant beibehalten, ergibt sich eine lineare Bestandsentwicklung während dieser Zeitspanne.

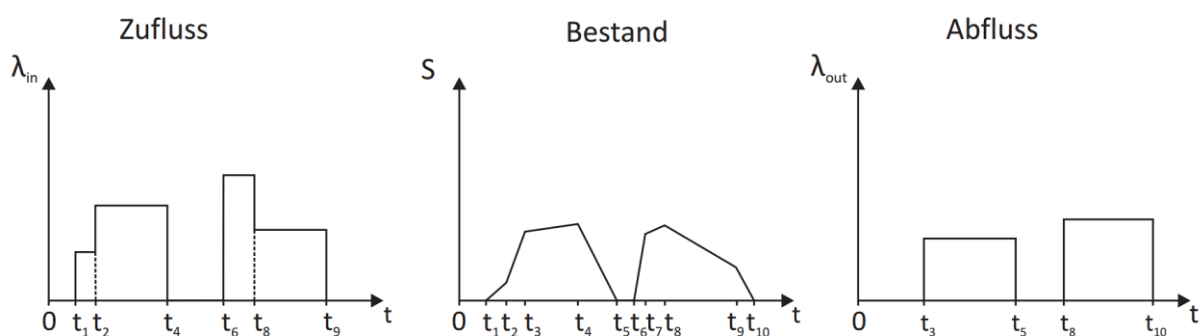


Abbildung 3.12: Zustandsveränderungen eines Discrete-Rate Prozessmodells  
[Reggelin 2011, S. 60]

Die Objekte fließen förmlich durch das Modell, eine Berechnung der linearen Flussrate zwischen zwei Ereignissen ist möglich. Damit ergibt sich eine erhebliche Verringerung der notwendigen Berechnungen während der Simulationsdurchführung, da diese nur zu bestimmten Ereignissen durchgeführt wird und die dynamischen Elemente als Flussraten (anstatt als einzelne Objekte) modelliert werden [Damiron & Nastasi 2008, S. 740 ff.]. Aufgrund dieser Darstellung kommt es allerdings zu einem Verlust an Genauigkeit bezogen auf DES-Modelle, die einzelne Objekte betrachten. Der Discrete-Rate Ansatz findet aktuell Anwendung bei der Untersuchung von Problemen, die diskreter Natur sind, jedoch eine Flussdarstellung der Produktion erfordern. Als Beispiele hierfür können Planungsaufgaben in der chemischen Industrie (Floudas und Lin, 2004, S. 2114) oder Hochgeschwindigkeits-Produktionsprozesse mit ähnlichen Merkmalen wie die Verarbeitung von Gas oder Joghurt genannt werden [Reggelin 2011, S. 26 ff.]. Als Simulationskomponente für eine Kopplung mit heuristischen Optimierungsverfahren zur Lösung der vorliegenden Problemstellung ist die Performance der DR-Simulation zu prüfen. Neben der (zu DES-Modellen) deutlich verkürzten Rechenzeit ist die Möglichkeit einer Lostrennung (Auftragsplitting) während des Prozesses möglich, da die Objekte durch das System „fließen“. Das gleichzeitige Produzieren von unterschiedlichen Aufträgen auf einer Maschine ist hingegen mit Informationsverlusten verbunden, da die Flüsse der verschiedenen Aufträge in diesem Fall zusammengeführt werden müssen. Zudem widerspricht die Fertigung eines Auftrags mit Losgröße 1 (was durchaus im vorliegenden Produktionsprozess vorliegen kann) der Philosophie einer flussbasierten Abbildung.

Der von [Reggelin 2011] vorgestellte **Mesoskopische Simulationsansatz (MS)** soll eine bessere (hybride) Modellierung und Simulation von logistischen Flusssystemen gewährleisten. Das wird erreicht, indem der Raum zwischen den DE- und SD-Modellen hinsichtlich der Genauigkeit sowie des Modellierungs- und Rechenaufwands geschlossen wird (Abbildung 3.13). Ziel ist somit die Bereitstellung eines Leitfadens für die Modellierung logistischer Systeme, die eine höhere Genauigkeit als SD-Modelle aufweisen und dabei deutlich geringere Rechenzeiten als DE-Modelle benötigen, vgl. [Schenk et al. 2010].

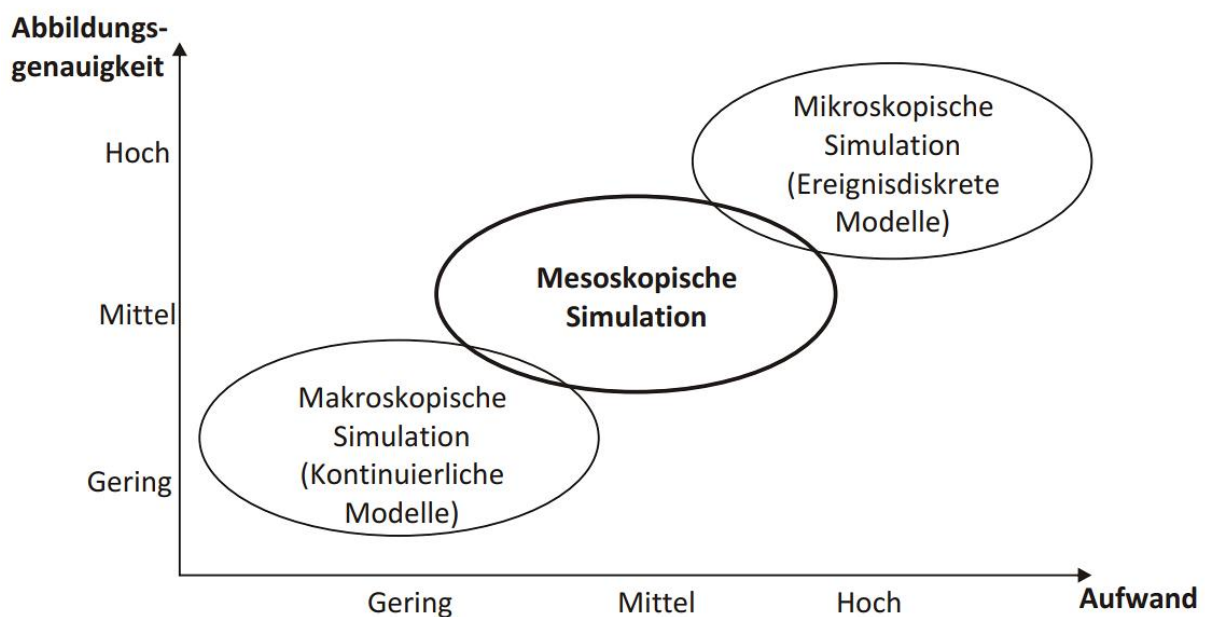


Abbildung 3.13: Einordnung des mesoskopischen Simulationsansatzes  
[Reggelin 2011, S. 2]

Dazu werden Komponenten aus SD- und DE-Ansätzen sinnvoll vereinigt. Es entsteht, je nach Anforderung des Modellierers, die Möglichkeit, ein Modell zu konzipieren, welches:

- aus detaillierten (mikroskopischen), rechenintensiven DE-Komponenten und
- aus weniger detaillierten (makroskopischen und flussbasierten), schnell zu ermittelnden SD-Elementen besteht.

Oft werden an bestimmten Teilprozessen des Modells besonders detaillierte Informationen benötigt. Hierzu zählen beispielsweise die Aufträge in einer Warteschlange [Borshchev & Filippov 2004, S. 6] oder der Bearbeitungsstand eines Auftrags bestehend aus mehreren Produkten auf einer Maschine. Andere Prozesse, wie beispielsweise Transporte zwischen den einzelnen Produktionsstufen, können dagegen weniger detailliert betrachtet und somit makroskopisch abgebildet werden, um die Rechenzeit entsprechend zu reduzieren. Gemäß Reggelin und Schenk ist es möglich, den Materialfluss als zeitlosen Impuls<sup>46</sup> oder stückweise konstant als Flussrate darzustellen [Reggelin 2011, S. 38], vgl. Abbildung 3.14.

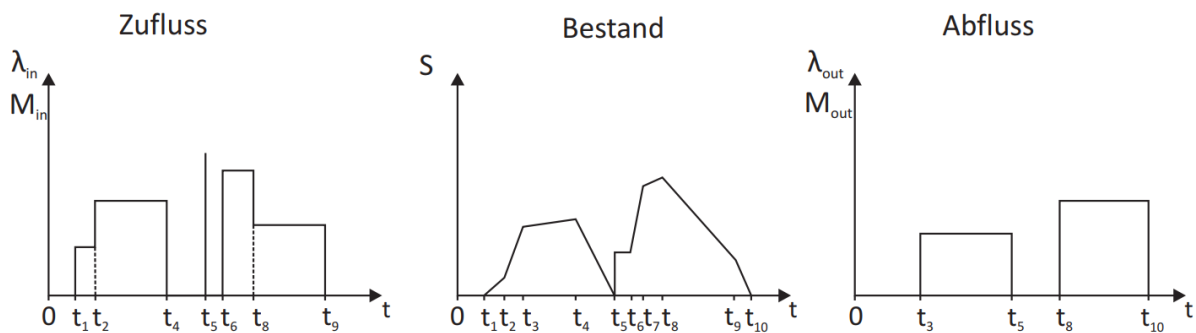


Abbildung 3.14: Zustandsveränderungen eines mesoskopischen Prozessmodells  
[Reggelin 2011, S. 61]

Der Nachteil in SD-Modellen, nur eine flussratenbasierte Variable je Produkt zu vergeben, wird im mesoskopischen Ansatz durch die Erzeugung von unterschiedlichen Produkttypen beseitigt. Somit ergibt sich die Gesamtflussrate aus der Summe der Variablen der unterschiedlichen Produkttypen. Diese Produkttypen können zusätzlich aus Produktportionen bestehen, um beispielsweise verschiedene Lose oder Aufträge je Produkttyp differenzieren zu können [Reggelin 2011, S. 37 ff.]. Bisher gibt es nur wenige Arbeiten, die mit Hilfe des mesoskopischen Ansatzes Simulationsmodelle erstellt und genutzt haben. Die Vorteile einer einfachen Modellierung, geringer Rechenzeiten sowie die Verwendung von impulsartigen Flüssen können bei vielen produktionslogistische Problemstellungen neue Möglichkeiten bieten, zu besseren Lösungen zu gelangen. Diese Art der Modellierung kann demzufolge auch bei Aufträgen mit einer Losgröße von 1, unterschiedlichen (vermischten) Aufträgen auf einer Maschine sowie zum Splitten von Aufträgen eingesetzt werden.

#### *Kopplung von Simulation und Optimierungsalgorithmen*

Die positiven Eigenschaften der verschiedenen Optimierungs- und Simulationsverfahren lassen sich durch eine entsprechende Verknüpfung weiter verstärken. Gemäß Hierarchie, zeitlicher Aufeinanderfolge und gegenseitiger Abhängigkeiten der verwendeten Simulations- und

<sup>46</sup> etwa kann die Bestandsmenge eines Puffers zu einem Zeitpunkt um  $x$  Stück erhöht werden; klassisch ist hier das Beispiel einer LKW-Entladung, die einen bestimmten Bestand sprunghaft entstehen lässt

Optimierungsansätze [VDI-3633, 1- 3, Blatt 12] entstehen vier Verbindungsarten, die in Abbildung 3.15 zusammengefasst werden.

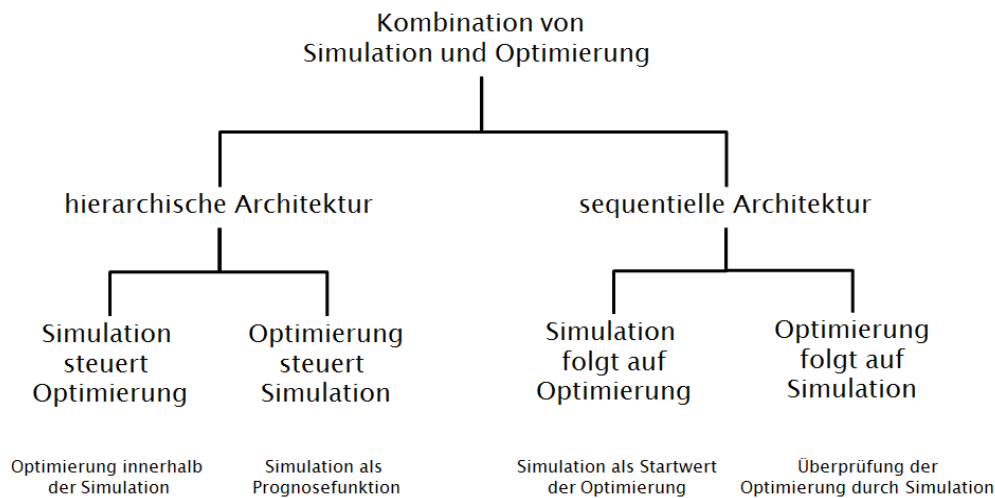


Abbildung 3.15: Kopplungsmöglichkeiten von Simulation und Optimierung, in Anlehnung an [März et al. 2011, S. 42 ff.]

Im Rahmen mehrerer Arbeiten der Otto-von Guericke- Universität Magdeburg werden (vor dem Hintergrund einer vereinfachten Problemstellung) unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die auf Basis der Kopplung von unterschiedlichen Simulationsansätzen mit verschiedenen Optimierungsverfahren zu Lösungen gelangen. Es sollen einige Ergebnisse daraus aufgeführt werden.

Zur Lösung des zweistufigen HFS- Problems  $HFS2(P4, P5) | s_{g,h} | C_{max}, \sum T_j$  setzt [Aurich 2017] die Kombination von Simulated Annealing und ereignisdiskreter Simulation ein. Hierbei erfolgt eine Reduzierung der Komplexität des Ausgangsproblems, indem eine Trennung von Allokation und Sequenzierung auf der jeweiligen Produktionsstufe durchgeführt wird. Im Ergebnis lässt sich das statische Problem lösen. Es werden gute Produktionspläne gefunden. Allerdings verweist Aurich auf die notwendige hohe Aggregationsebene zur Erstellung eines schnellen Modells sowie auf lange Rechenzeiten, die es nicht erlauben, schnelle Entscheidungen zu treffen.

Die ereignisdiskrete Simulation als Bewertungsfunktion der Optimierung nutzt [Feilke 2016] für seinen Ansatz zur Lösung des gleichen Ausgangsproblems, wobei die beiden Prozesse iterativ ablaufen. Er beschreibt zwei unterschiedliche Lösungsansätze. Die erste Variante verwendet einen genetischen Algorithmus zur Allokation und Sequenzierung von Aufträgen der ersten Produktionsstufe, während ausgesuchte Prioritätsregeln diese Aufgaben für die zweite Stufe übernehmen. In Variante zwei führt Feilke einen Allokationsalgorithmus ein, der die Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen der ersten Stufe übernimmt, während die anschließende Sequenzierung wiederum mit Hilfe eines genetischen Algorithmus erfolgt. Auch bei dieser Variante kommen Prioritätsregeln für die zweite Produktionsstufe zum Einsatz. Er kommt zum Ergebnis, dass beide Varianten für kleine Probleminstanzen gute Ergebnisse in einer kurzen Zeit ermitteln können. Mit steigender Problemgröße stoßen die Verfahren an ihre Grenzen, es werden instabile Ergebnisse generiert, die zusätzlich hohe Rechenzeiten benötigen.

Zur Lösung eines zweistufigen HFS formuliert [Nahhas 2017] seinen Ansatz „Integrated-Simulation-Based Optimization“. Auch er trennt Allokation und Sequenzierung, wobei die Zuordnung der Aufträge zu den parallelen Maschinen auf der ersten Produktionsstufe mit Hilfe der Prioritätsregel „Shortest

Processing Time“ erfolgt. Aufgrund des Vorhandenseins von familienbedingten Rüstzeiten werden zuvor alle Aufträge entsprechend ihrer Familienzugehörigkeit geordnet. Er formuliert für diesen Schritt fünf Regeln, beispielsweise müssen alle Aufträge einer Familie genau einer Maschine zugeordnet werden (um potenzielle Rüstzeiten zu vermeiden) und die benötigte Produktionszeit sollte auf allen SMD-Linien ausgeglichen sein. Die Sequenzierung auf den einzelnen Maschinen wird durch vier verschiedene Varianten durchgeführt. Neben den Prioritätsregeln EDD (Earliest Due-Date) und SPT (Shortest Production Time) kommt die sog. Familienproduktion zur Anwendung, die laut Angabe des problemgebenden Unternehmens die derzeit am meisten verwendete Methode darstellt. Dabei wird darauf geachtet, dass alle Produkte einer Familie nacheinander produziert werden, um Rüstzeiten zu minimieren. Etwaige Verspätungen anderer Aufträge werden damit akzeptiert. Die vierte Variante stellt die integrierte simulationsbasierte Optimierung dar. Zwei unterschiedliche Algorithmen kommen darin zur Lösung der ersten Stufe des Produktionsprozesses zum Einsatz – verantwortlich für Sequenzierung und Allokation. Der Sequenzierungsalgorithmus besteht aus der Familien- und Auftrags-Ebene. Mit Hilfe von Routinen und durch den Einsatz von Regeln, die einen mehrmaligen Wechsel von Familien- und Auftragsebene vollziehen, erfolgt die Bildung einer möglichst guten Sequenz auf der betrachteten SMD-Linie. Der Allokationsalgorithmus sorgt für eine ausgewogene Produktionslast auf den parallel angeordneten SMD-Linien. Dabei nutzt er eine ereignisbasierte Zuordnung, wenn innerhalb des Sequenzierungsalgorithmus ein kritischer Punkt erreicht wird und Aufträge anderweitig verteilt werden müssen. Zu festgelegten Zeitpunkten kommt ferner eine vordefinierte Zuordnung zum Einsatz, die alle freigegebenen, aber noch nicht produzierten Familien erneut auf die verschiedenen SMD-Linien aufteilt. Da auf der zweiten Stufe keine familienabhängigen Rüstzeiten bestehen, wird eine einfache Prioritätsregel (EDD) genutzt, die die Aufträge entsprechend den AOI-Geräten zuordnet. Für die Simulation werden unterschiedliche Bibliotheken von ExtendSim benötigt, die den mesoskopischen Grundgedanken nochmals unterstreichen. An drei unterschiedlichen Datensätzen, die jeweils eine, zwei oder vier Produktionswochen abbilden, werden die unterschiedlichen Lösungsalternativen gemäß Gesamtproduktionszeit sowie Verspätung untersucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl für die Minimierung der Gesamtproduktionszeit als auch für die Minimierung der verspäteten Aufträge die integrierte simulationsbasierte Optimierung bessere Ergebnisse erzielt als die anderen drei untersuchten Verfahren. Hinzu kommt, dass die Planerstellung nur zwischen 8 und 18 Sekunden (bei 1-4 Wochen Produktionsauftragsbestand) dauert, und damit aus Sicht des Autors ein weiterentwicklungswürdiger Ansatz zur Lösung des vorliegenden Problems darstellt. Das vierstufige HFS-Problem  $HFS4(P4, P5, 1, 1) | d_j, s_{abi}, s_{ji}, r | C_{max}, \sum D_j, \sum S$  steht im Fokus der Arbeit von [Aurich 2017], welches als eine Erweiterung zum zuvor betrachteten Problem angesehen werden kann. Dabei liegen auf den ersten beiden Produktionsstufen jeweils parallele Maschinen vor. Versucht wird, das deterministische Maschinenbelegungsproblem zu lösen, indem zunächst auf den ersten beiden Stufen die Sequenzierung von der Allokation getrennt wird. Anschließend erfolgt die Zuordnung der Aufträge zu den Maschinen auf der ersten Stufe mit Hilfe von ausgewählten Metaheuristiken. Alle weiteren Probleminstanzen werden durch in die Simulation integrierte Algorithmen und Regeln gelöst. Aurich stellt fest, dass generell alle verwendeten Metaheuristiken<sup>47</sup> für die Lösung des Allokationsproblems geeignet sind und gute Ergebnisse liefern. Um noch bessere Lösungen zu generieren, müssten weitere Iterationen je Optimierung durchgeführt werden, was die schon jetzt langen Rechenzeiten noch einmal

<sup>47</sup>Zum Einsatz kommen die Verfahren Simulated Annealing, Tabu Search sowie Differential Evolution

deutlich erhöhen würde. Ein Einsatz unter praxisnahen Bedingungen ist somit aufgrund der Rechenzeit, die sich im Stundenbereich befindet, ausgeschlossen.

### 3.4 Zusammenfassung

Produktions- und Logistiksysteme unterliegen „vielfältigen dynamischen und stochastischen Wechselwirkungen, die eine statische Abschätzung des Verhaltens erschweren oder sogar unmöglich machen“ [März et al. 2011, S. 4].

Wie bereits zu Beginn des Abschnitts erläutert, finden exakte oder optimale Verfahren zur Lösung praxisrelevanter Problemstellungen einer HFS-Produktion aufgrund der vorliegenden Komplexität keine Anwendung und dienen vorrangig wissenschaftlichen Zwecken. Dem gegenüber stehen heuristische Verfahren, mit deren Hilfe in der Vergangenheit eine große Anzahl verschiedenster Lösungsmöglichkeiten entwickelt wurde. Als vorherrschende Verfahren können somit eindeutig heuristische und metaheuristische Optimierungstechniken angeführt werden. In Tabelle 3.1 erfolgt eine abschließende Bewertung existierender Verbesserungsverfahren anhand der in Kapitel 2 definierten Anforderungen an zukünftige Systeme und Verfahren zur Unterstützung einer echtzeitfähigen Fertigungsfeinplanung. Zusätzlich wurde (neben Rechenaufwand und Lösungsgüte) das Kriterium der Anwendbarkeit auf die vorliegende Problemkomplexität hinzugenommen. Es wird deutlich, dass keines der untersuchten, bereit existierenden Verfahren allen zukünftigen Anforderungen gerecht wird. Die Ergebnisse von Lösungsgüte und Rechenzeit verhalten sich oft konträr zueinander, die Forderung der Echtzeitfähigkeit erfüllen nur die prioritätsbasierten Verfahren, ML sowie die Verfahren der simulationsgestützten Optimierung. Die Entwicklung von neuen Verbesserungsverfahren, die den gestellten Anforderungen zukünftig besser gerecht werden, ist eine notwendige Schlussfolgerung.

Bisher existieren zur vorliegenden, multikriteriellen Problemstellung nur wenige wissenschaftliche Arbeiten. In der von Ruiz und Vázquez-Rodríguez vorgestellten, umfassenden Literaturrecherche, die mehr als 200 Beiträge in der HFS-Forschung umfasst [Ruiz & Vázquez-Rodríguez 2010], ist dargelegt, dass über 60% aller Beiträge ausschließlich als Ziel die Minimierung des Makespan betrachten. Demnach wiesen nur 2% eine multikriterielle Zielfunktion aus, die in der Praxis jedoch nahezu immer vorliegt, vgl. Abbildung 3.16.

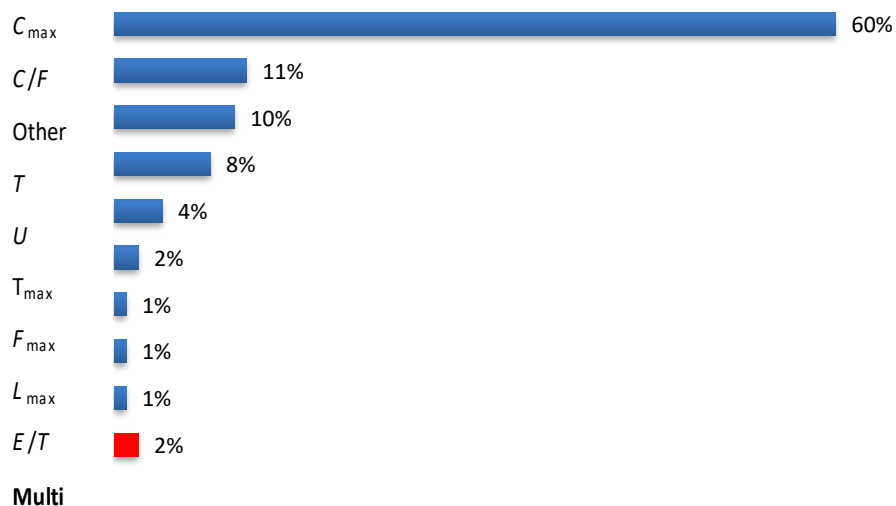


Abbildung 3.16: Zielgrößenverteilung untersuchter Arbeiten [Ruiz & Vázquez Rodríguez 2010]

Zudem wird kritisch diskutiert, dass die meisten der vorgestellten Heuristiken nur auf die jeweiligen Problemtypen abgestimmt und ausgelegt sind, beispielsweise durch eine festgelegte Anzahl von Maschinen oder Stufen. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommen auch [Ribas et al. 2010], die in ihrer 160 Beiträge umfassenden Recherche besonders die mangelnde Anwendbarkeit sowie die oftmals unrealistischen, stark vereinfachten Problemstellungen kritisieren. Auch ihre Erhebung beinhaltet nur sehr wenige Arbeiten mit multiplen Zielvorgaben. Ein weiterer Kritikpunkt ist die fehlende Involvierung realer Daten sowie praxisnaher Erfahrungen in die entwickelten Ansätze, die damit oftmals nicht auf die Realität übertragbar sind. Die bestehenden, oft theoretischen Ansätze können viele Problemstellungen aufgreifen und ggf. lösen, jedoch ist bisher keines der beschriebenen Verfahren in der Lage, die notwendigen Anforderungen zu realisieren. Metaheuristische Optimierungsverfahren können komplexe Systeme lösen, benötigen jedoch hohe Rechenzeiten, um gute Lösungen zu erzeugen.

Als erfolgsversprechende Möglichkeit der Problemlösung kann die Kombination von Simulation und heuristischen Optimierungsalgorithmen angesehen werden. Dazu stellen März et al fest, dass auch diese Techniken eine nicht unerhebliche Rechenleistung benötigen, und somit Ansätze präferiert werden, die eine Verkürzung der Suchvorgänge fördern [März et al. 2011, S. XI]. Untersuchungen zu dieser Thematik an der Universität Magdeburg können belegen, dass die Kombination von Simulation und heuristischen Optimierungsalgorithmen zu guten Lösungen bezüglich statischer, deterministischer Hybrid-Flow-Shop Probleme führen kann. Nahhas zeigt zudem, dass eine Lösung auch in sehr kurzer Zeit möglich ist. Aktuelle Arbeiten lösen jedoch nur einfache Problemgrößen. An dieser Stelle setzt diese Arbeit an. Die Entwicklung von neuen Verbesserungsverfahren auf Basis von simulationsgestützter Optimierung zur Lösung komplexer Problemstellungen soll Schwerpunkt des fünften Kapitels sein und die Forschungsfrage F3 positiv beantworten.

Tabelle 3.1: Bewertung ausgewählter Verbesserungsverfahren anhand der vorliegenden Problemstellung gemäß durchgeführter Literaturrecherche (Auswahl)

Referenz	Verbesserungs- verfahren	Anwendbarkeit auf vorliegende Problemkomplexität	Rechen- aufwand	Lösungs- güte
[Alvarez-Valdes et al. 2005, S. 525 ff.] [Voss & Witt 2007, S. 445 ff.] [Adler et al. 1993, S. 641 ff.] [Panwalkar & Iskander 1977, S. 45 ff.] [Haupt 1989, S. 3 ff.] [Neidhardt 2007]	Prioritäts- regeln			
[Adams et al. 1988, S. 391 ff.] [Pinedo 2016, S. 195 f.]	Shifting- Bottleneck			
[Józefowska et al. 1998, S. 354 ff.] [Youssef et al. 2001, S. 167 ff.] [Kirkpatrick et al. 1983, S. 671 ff.] [Ogbu & Smith 1991, S. 64 ff.] [Ishibuchi et al. 1995, S. 388 ff.] [Low 2005, S. 2013 ff.] [Tabriz et al. 2009, S. 1943 ff.] [Mirsanei et al. 2011b, S. 965 ff.] [Aurich et al. 2016a, S. 95 ff.] [Aurich et al. 2016b]	SA			
[Ben-Daya & Al-Fawzan 1998, S. 88 ff.] [Nowicki & Smutnicki 1998, S. 226 ff.] [Norman 1999, 163 ff.] [Wardono & Fathi 2004, S. 380ff.] [Kulcsár et al. 2007, S. 127 ff.]	TS			
[Holland 1975] [Cheng et al. 1995, S. 513 ff.] [Reeves 1995, S. 5 ff.] [Kurz & Askin 2004, S. 66 ff.] [Serifoğlu & Ulusoy 2004, S. 504 ff.] [Quadt & Kuhn 2007, S. 686 ff.]	GA			
[Amiri et al. 2018] [Wei et al. 2019] [Watkins & Dayan 1992] [Zacharias et al. 2019] [Kuhnle et al. 2019] [Lang et al. 2020] [Schoonhoven et al. 2019]	RL			
[Aurich 2017] [Feilke 2016] [Nahhas 2017]	Simulations- basierte Optimierung			
sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut



## 4 Konzeption einer echtzeitfähigen Feinplanung für eine HFS – Produktion

Im folgenden Kernteil der Arbeit wird eine Methodik entwickelt, welche die heute bereits bestehenden Konzepte zur operativen Produktionsfeinplanung ergänzt und in Hinblick auf eine echtzeitbasierte Reaktion und Realisierung erweitert. Die vorliegende, praxisnahe Problemstellung ist dynamisch, stochastisch und von einer unvollständigen Informationslage gekennzeichnet. Die HFS-basierte Produktion weist zudem eine hohe, *NP*-harte Komplexität auf. Zur Lösung wird ein prädikativ-reaktives Verfahren vorgestellt, welches in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben wird. Abbildung 4.1 fasst das Konzept zusammen. Unterkapitel 4.1 stellt das Gesamtkonzept zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion vor. Daraus ableitend erfolgt neben Erläuterungen zum Datenmodell eine genaue Beschreibung des entwickelten Feinplanungssystems in Abschnitt 4.2. Anschließend beschreiben die weiteren Abschnitte die Konzeption zur prädikativen (4.3) und reaktiven Planung (4.4). Eine Zusammenfassung schließt das vierte Kapitel ab (4.6).

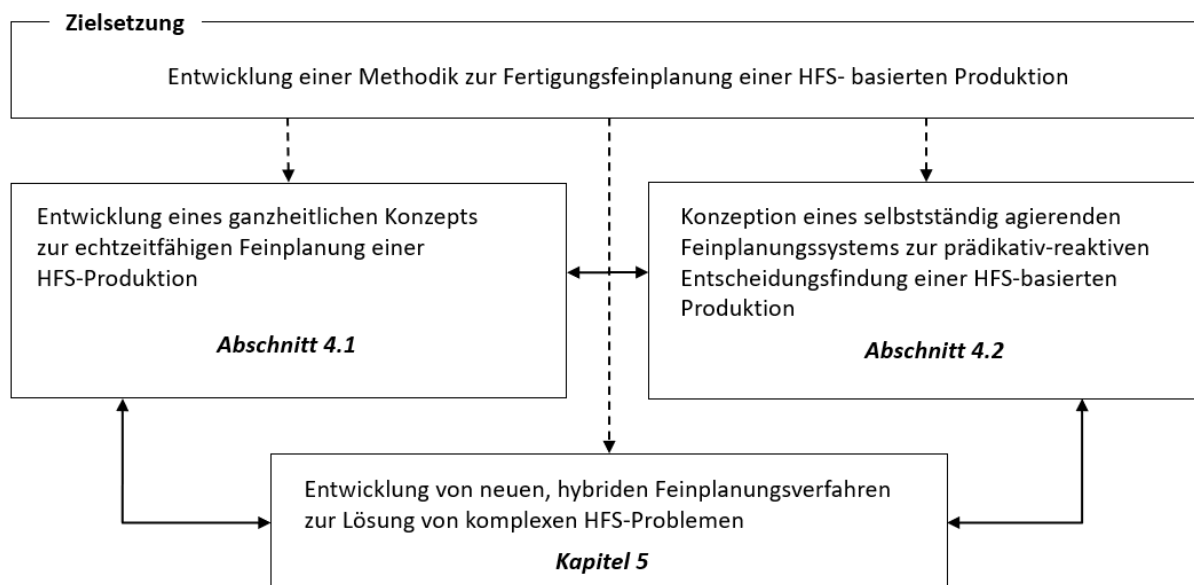


Abbildung 4.1: Gliederung von Kapitel 4 und 5 gemäß der auferlegten Zielstellung

### 4.1 Gesamtkonzept im Überblick

Die logische Weiterentwicklung der Automatisierungspyramide hin zu umfangreicher Vernetzung und Verbindung der Akteure über alle Ebenen in horizontaler, als auch vertikaler Richtung [Hoppe 2017, S. 122] eröffnet neue Möglichkeiten einer direkten (Hin- und Rück-) Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Teilnehmern. Dazu notwendige Informationen müssen echtzeitnah und in einer einheitlichen, verarbeitbaren Form bereitgestellt werden. Die Speicherung übernimmt eine *Datenbank*, die im Netzwerk eingebunden ist. Generell bildet erst das Vorhandensein dieser Daten, die

zum einen aus den eingesetzten Systemen (beispielsweise ERP, MES oder APO) stammen bzw. in der Produktion kontinuierlich generiert und über entsprechende MDE, BDE oder manuelle Erfassungsterminals aufgenommen werden, die Grundlage des neuen Konzeptes zur Feinplanung einer HFS-Produktion. Die einzelnen Akteure sind über interne oder externe Netzwerke miteinander verbunden (Abbildung 4.2), eine gesamtheitliche Datentransparenz wird damit erzeugt. Das entwickelte Feinplanungssystem greift nach Bedarf auf die bereitgestellten Informationen zurück, analysiert diese, und entscheidet (ohne aktiven Eingriff eines Planers), welche Reaktion auf die vorliegende Ist-Situation zu erfolgen hat. Durch die direkte Kommunikation zwischen der operativen Ebene und dem Feinplanungssystem entsteht ein neues Paradigma. Der Planer rückt in den Hintergrund, ist nicht länger der alleinige Entscheider und Ausführer der Feinplanung. Zukünftig erwartet beispielsweise ein Maschinenbediener, der eine Störung einer Maschine (digital) meldet, umgehend einen der neuen Situation angepassten Produktionsplan. Wie in Abschnitt 2.8 beschrieben, ist dieses Vorgehen durch den Planer in den meisten Fällen nicht leistbar und wird daher automatisiert vom Feinplanungssystem übernommen. Dieses hat dabei die Aufgabe, die in diesem Beispiel aufgezeigte Störung nicht nur in der meldenden Abteilung zu berücksichtigen. Gemäß den nun gegebenen Umständen ist auch für alle direkt und indirekt betroffenen, d.h. parallelen oder nachfolgenden Bereiche der vorliegende Plan zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren.

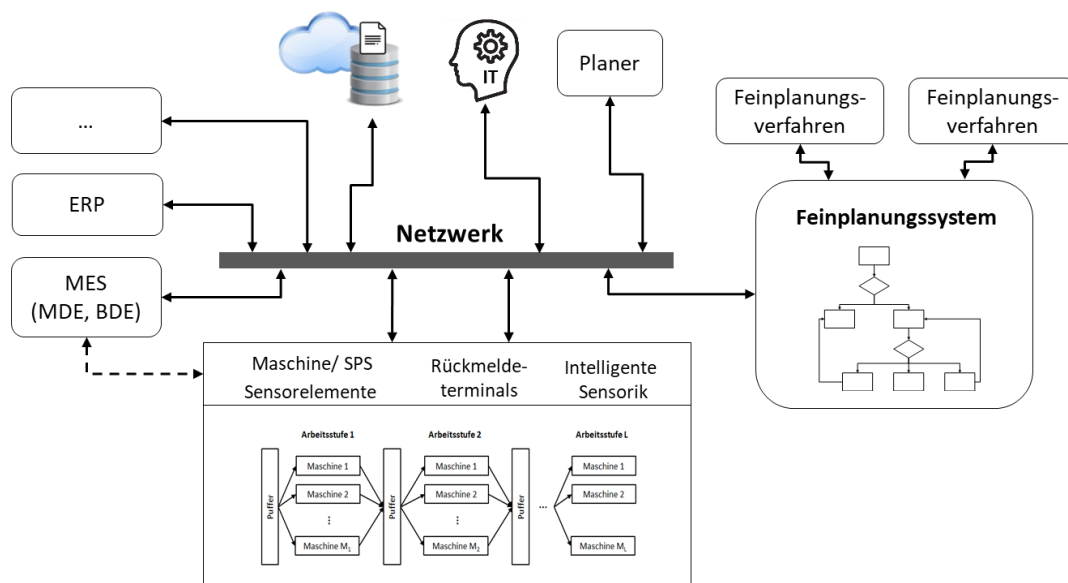


Abbildung 4.2: Gesamtkonzept der echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion

Zukünftig soll es möglich sein, die notwendige, reaktive Anpassung des Plans in allen betroffenen Abteilungen bereits umgesetzt zu haben, bevor die Nachricht einer Störung vorgelagerter Bereiche verbal kommuniziert wird. Als ein Hauptakteur des Unternehmens ist die *HFS-basierte Produktion* über diverse Schnittstellen mit dem Netzwerk verbunden. Zum heutigen Standard in der Elektronikfertigung gehören Maschinen (beispielsweise zur SMD-Bestückung, optischen Kontrolle oder Selektiv-Lötung), die über diverse Sensoren viele Informationen aufnehmen und weitergeben können. Dazu zählen beispielsweise Daten über den Abarbeitungsstand von den auf der Maschine befindlichen Aufträgen, Bearbeitungsgeschwindigkeiten oder Stillstandzeiten. Ferner ist eine automatisierte Rückmeldung von Fertigungsaufträgen in das ERP- oder MES-System möglich. Der Maschinenbediener hat zusätzlich mit Hilfe von Terminals die Möglichkeit, seine Informationen (beispielsweise über Aufträge oder Störungen) in das Netzwerk einzubringen. Ziel ist es dabei, alle notwendigen Informationen für das

Feinplanungssystem bereitzustellen, damit das Konzept einer echtzeitnahen Feinplanung umsetzbar wird. Die Planer der Fertigung haben (mit Hilfe von Systemschnittstellen) die Möglichkeit, Veränderungen an den zur Planung notwendigen Informationen vorzunehmen. Diese können beispielsweise eine kurzfristige Änderung des Arbeitsplans eines Produktes sein, um die festgelegte Maschinenbelegung (automatisch) verändern zu lassen. Das Feinplanungssystem nimmt diese Veränderungen (als Störung) auf und aktualisiert ggf. den bestehenden Fertigungsplan. Damit ändert sich der direkte Einfluss der Planer auf die Feinplanung hin zu einer (nur noch) indirekten Steuerung. Notwendige Veränderungen am Feinplanungssystem werden zukünftig ausschließlich durch die *IT-Abteilung* vorgenommen. Die dazu ausgebildeten Experten greifen ein, wenn grundsätzliche Anpassungen notwendig sind. Ursachen hierfür können neue Maschinen oder Technologien sowie veränderte Abläufe in der Fertigung sein. Generell ist sicherzustellen, dass das digitale Abbild der Produktion, welches für die Feinplanung verwendet wird, mit der „realen Welt“ möglichst gut übereinstimmt. Nur so können die erzeugten Plandaten sinnvoll übertragen und genutzt werden. Im folgenden Kapitel 4.2 wird das entwickelte Feinplanungssystem umfassend erläutert.

## 4.2 Das Feinplanungssystem

Zur Lösung der vorliegenden Problemstellung ist ein Feinplanungssystem mit prädikativ-reaktivem Charakter zu entwickeln. Während der ersten, prädikativen Phase wird ein initialer Produktionsplan erstellt. Dieser Plan ist statisch und basiert auf allen bis zum Zeitpunkt der Erstellung bekannten Informationen. Treten nun während der Produktion veränderte Bedingungen auf, die eine Anpassung des vorliegenden Plans erfordern, startet die zweite, reaktive Phase. Gemäß der veränderten Ausgangsbedingungen erfolgt eine Prüfung, ob die Planabweichung eine Anpassung des bestehenden Plans bedingt und welche Bereiche der Produktion von der Änderung betroffen wären. Anschließend erfolgt ggf. eine Aktualisierung des Plans gemäß den neu vorliegenden Informationen. Auch die zweite Phase nutzt dafür eine statische Planungsumgebung, bei der ausschließlich vorhandene Informationen verwendet werden (Abbildung 4.3).

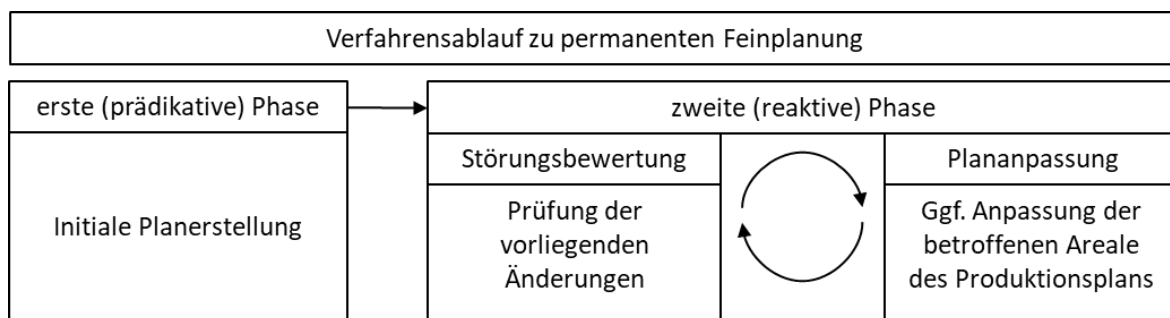


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau des prädikativ-reaktiven Konzeptes

In der Praxis kommt es häufig zu (kurzfristigen) Änderungen in der Produktion. Beispielsweise werden kontinuierlich neue Produktionsaufträge freigegeben, Maschinen fallen aus oder Produktionszeiten einzelner Aufträge verändern sich. Nach der ersten, initialen Phase kommt es daher schnell zum Übergang in die zweite, reaktive Phase. Diese bildet den Kern der Untersuchung, denn obwohl in der Literatur bereits einige Verfahren zur Planung einer HFS-basierten Produktion beschrieben sind, wird die Integration und Reaktion auf Störungen bisher größtenteils vernachlässigt [Gholami et al. 2009, 189 ff.]. Das entwickelte Feinplanungssystem (Abbildung 4.4) besteht aus den drei Elementen

*prädikatives Planungsmodul*, *zentrales Steuerungsmodul* sowie *reaktives Planungsmodul*. Prinzipiell können durch diesen Aufbau unterschiedliche Produktionsformen an das Feinplanungssystem angebunden werden, wengleich dazu eine Anpassung bzw. Auswahländerung der eingesetzten Feinplanungsverfahren notwendig wird. Das zentrale Steuerungsmodul als Kernelement wird durch die Systemdatenbank mit den notwendigen Informationen versorgt. Auf Grundlage dieser Daten kann bei Bedarf das prädikative oder reaktive Planungsmodul aktiviert werden. Diese Module nutzen die übermittelten Informationen und generieren mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Feinplanungsverfahren initiale (prädikative), oder aktualisierte (reaktive) Planvorschläge, die an das zentrale Steuerungselement übergeben werden. Gemäß der definierten Zielkriterien wird der beste Produktionsplan ausgewählt und der Systemdatenbank (und somit allen Akteuren) über das Netzwerk zur Verfügung gestellt.

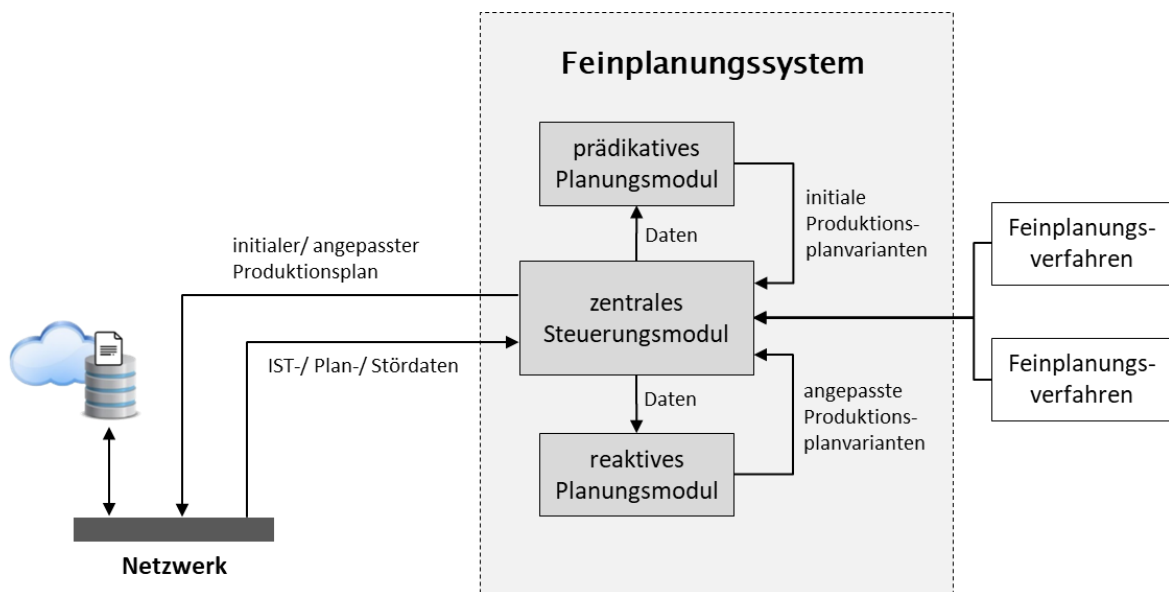


Abbildung 4.4: Aufbau des entwickelten Feinplanungssystems

Zusätzlich verfügt das zentrale Steuerungsmodul über eine Offline-Schnittstelle mit diversen Funktionen, die von außenstehenden Benutzern (beispielsweise Planer oder Controller) genutzt werden können. Hierzu zählt die Visualisierung bzw. der Vergleich einzelner Produktionspläne gemäß der Zielkriterien oder die Möglichkeit einer Offline-Planung, um verschiedene Szenarien überprüfen und testen zu können. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine genaue Erläuterung der einzelnen Module, Funktionen und Wirkzusammenhänge. Grundlage dafür ist das Datenmodell, welches vorab detailliert beschrieben wird.

### *Datenmodell*

Die für die Produktionsfeinplanung notwendigen Daten werden durch eine Datenbank bereitgestellt. Neben der Speicherung der initialen Ausgangsdaten werden auch die aktuellen Zustands- und Störungsdaten sowie die erzeugten Produktionspläne für eine spätere Analyse erfasst. Abbildung 4.5 fasst die unterschiedlichen Daten zusammen.

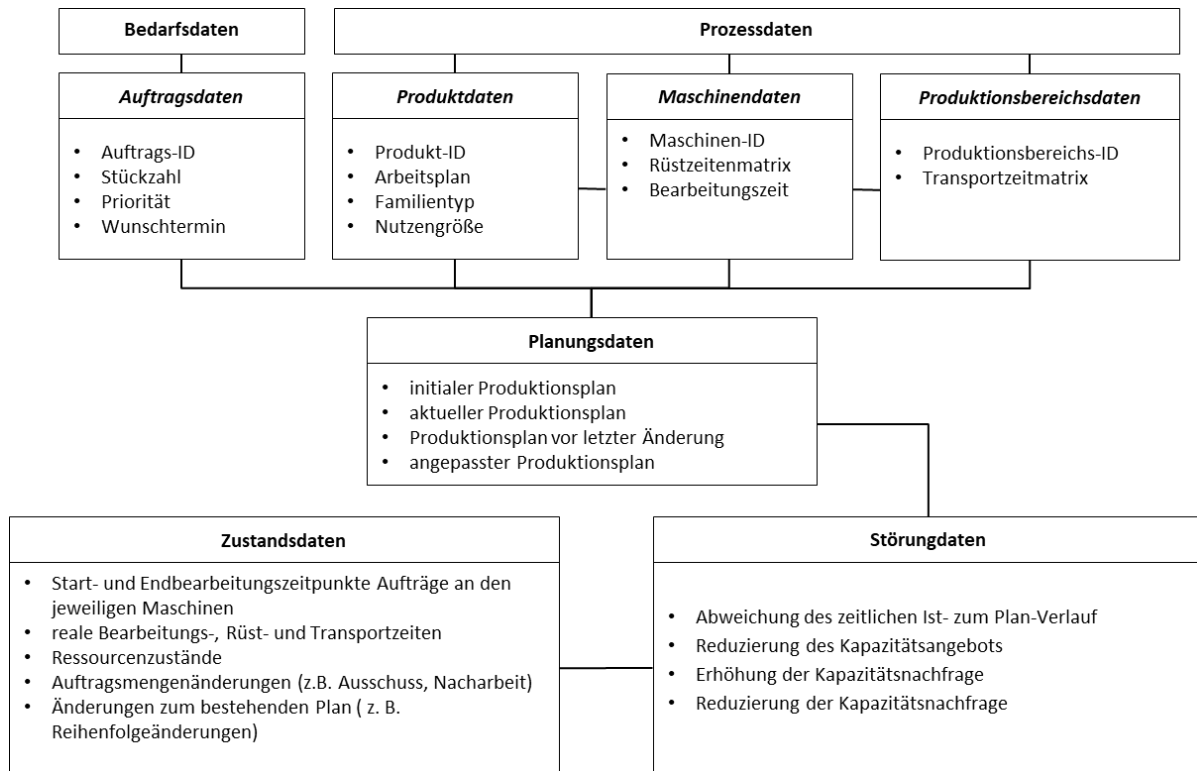


Abbildung 4.5: Datenmodell des entwickelten Konzepts

Die Grundlage zur Herstellung von Produkten bilden die (Kunden-) **Bedarfsdaten**, die mit Hilfe der Auftragserfassung über die gängigen ERP-Systeme der Datenbank bereitgestellt werden. Neben Stückzahl und Wunschtermin des jeweiligen Kunden-Auftrags, der für die Bearbeitung in einen internen Produktionsauftrag umgewandelt wird, erfolgt eine für die weitere Planung notwendige erste Priorisierung anhand des Wunschliefertermins.

Die erforderlichen **Prozessdaten** können in Produkt-, Maschinen- und Produktionsbereichsdaten unterschieden werden. Während produktspezifische Informationen wie Arbeitsplan, Nutzengröße oder Familientyp der jeweiligen elektronischen Baugruppe in der Datenbank fixiert sind, erfolgt eine Aktualisierung der maschinen- bzw. produktionsbereichsspezifischen Daten bei Bedarf. Damit ist es möglich, einer Hauptursache der fehlerhaften Planung (die Abweichung von realen Produktionsdaten zu statisch verwendeten Plandaten) entgegenzutreten. Unter Verwendung der kontinuierlich aufzunehmenden Ist-Daten des realen Produktionssystems werden die gespeicherten Rüst-, Bearbeitungs- und Transportzeiten überprüft und bedarfsorientiert der Realität angepasst bzw. dem Planer zur Kontrolle vorgelegt.

Damit eine Überprüfung und ggf. reaktive Anpassung des aktuell erstellten Produktionsplans erfolgen kann, müssen dazu notwendige **Zustandsdaten** des realen Produktionssystems erfasst und abgelegt werden. Diese bilden den Zustand des realen Produktionssystems ab, indem beispielsweise die tatsächlichen Start- und Endbearbeitungszeitpunkte der Aufträge gemeldet und erfasst werden. Ziel der Aufnahme dieser dynamischen Daten ist eine möglichst hohe Abbildegenauigkeit der Realität, um relevante Abweichungen zur bestehenden Planung (im laufenden Produktionsbetrieb) erkennen zu können. Ressourcenzustände, produktionsbedingte Mengenänderungen oder die Nichteinhaltung des vorgegebenen Produktionsplans sind weitere Beispiele hierfür. Viele der derzeit eingesetzten Planungssysteme sind in der Lage, ausschließlich aggregierte Informationen aus der Produktion zu verarbeiten. Beispielsweise kann ein Auftrag durch den Status „vor Bearbeitung“, „in Bearbeitung“

oder „nach Bearbeitung“ beschrieben werden. Diese Clusterung ist jedoch für die reale Erfassung des Auftragszustandes nicht ausreichend. Durch die exakte Rückmeldung auch einzelner Leiterplatten eines Auftrags und deren Erfassung in der Datenbank können zukünftig genaue Rückschlüsse über den exakten Bearbeitungsstand des Auftrags gezogen werden. Somit kann die Qualität der Ausgangsdaten eines bestehenden Planungsproblems deutlich erhöht werden. Dazu notwendig sind Feinplanungsverfahren, die diese Detaillierung verarbeiten können. Sie werden im folgenden Kapitel beschrieben.

Neben den realen Zustandsdaten des Produktionssystems werden **Störungsdaten** erfasst und gespeichert. Wie in Abschnitt 3.1 erläutert können Störungen in vier Klassen eingeordnet werden. Während zeitliche Abweichungen über die Aufnahme der Zustandsdaten registriert werden, müssen Veränderungen des Kapazitätsangebots, etwa der Ausfall einer Ressource, separat gemeldet und erfasst werden. Änderungen der Kapazitätsnachfrage, beispielsweise durch den Wegfall oder die Stückzahlreduzierung von bereits zur Produktion freigegebenen Aufträgen, können während der Produktion entstehen (Ausschusserzeugung von Baugruppen oder die Notwendigkeit einer Nacharbeit an vorgelagerten Produktionsstufen), oder durch die Auftragserfassung in Form von stornierten Aufträgen bzw. Auftragsstückzahlen eingebracht werden. Kurzfristige Eil- oder sog. „Geschäftsführeraufträge“, die mit Hilfe ihrer geänderten Priorität eine sofortige Produktionsplanänderung bedingen, sind ebenfalls ein Teil der zu erfassenden Störungen.

Das Ablegen und Speichern älterer **Planungsdaten** ist sinnvoll, um spätere Analysetätigkeiten durchführen zu können. Neben den unterschiedlichen Belegungsplänen (initial, aktualisiert, aktuell gültig) werden die zugehörigen Zielfunktionswerte abgelegt. Diese Daten können anschließend durch die Planer-Schnittstelle abgerufen und ausgewertet werden. Somit lassen sich verschiedenste Analysen zur Planstabilität, zum Zielfunktionsverlauf oder diverse Ereignis-Auswirkungs-Erhebungen durchführen. Neben dieser Speicherung und Aufbewahrung älterer Planungsdaten besteht die Hauptaufgabe der Datenbank in der Bereitstellung des aktuell gültigen Belegungsplans über das Netzwerk für alle Akteure. Dieser beinhaltet alle relevanten Planungsdaten und ist die Grundlage für den Soll-Ist Abgleich.

### 4.3 Prädikative Planung zur initialen Planerstellung

Bevor die Produktion erstmalig gestartet wird, erfolgt die initiale, prädikative Produktionsplanerstellung. Ausgangspunkt sind (bereits existierende oder geplante) Kundenbedarfsdaten in Form von eröffneten Fertigungsaufträgen, die über das Netzwerk in die Datenbank gelangen. Das zentrale Steuerungsmodul des Feinplanungssystems nimmt die Anforderungen auf und versucht, einen Abgleich mit dem bestehenden Fertigungsplan durchzuführen. Da zu dieser Zeit noch kein gültiger Plan existiert, wird der *prädikative Planungszyklus* angestoßen, Abbildung 4.6 zeigt den allgemeinen Ablauf dazu.

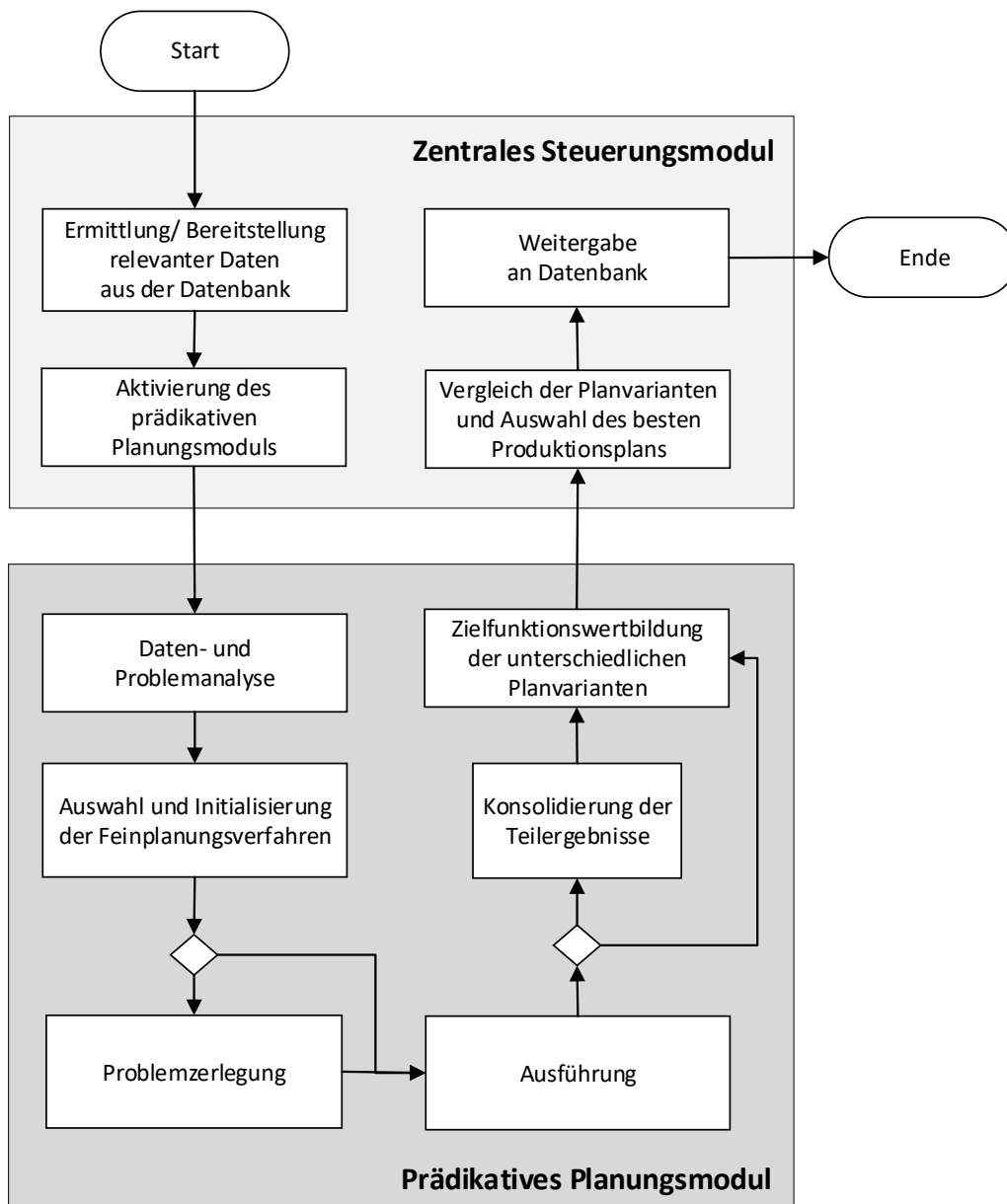


Abbildung 4.6: Ablauf der prädikativen Planerstellung

Die ermittelten und von der Datenbank bereitgestellten Informationen sind dabei statisch und deterministisch. Zukünftige (stochastische) Ereignisse werden nicht berücksichtigt. Neben den Bedarfsdaten sind für die geeignete Verfahrensauswahl die Prozessdaten von entscheidender Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2). So wird die spätere Auswahl und Initialisierung der Feinplanungsverfahren maßgeblich durch die bekannten Produkt- und Maschinendaten bestimmt. Alle notwendigen Informationen werden angefordert und durch die zentrale Datenbank bereitgestellt. Im Anschluss erfolgt die Aktivierung des prädikativen Planungsmoduls durch das zentrale Steuerungselement. Zunächst werden die vorliegende Problemstellung sowie die dazu bereitgestellten Daten analysiert. Damit möglichst viele unterschiedliche, erfolgsversprechende Feinplanungsverfahren eingesetzt werden können, erfolgt für Verfahren, die gemäß dem Prinzip „Teile und Herrsche“ agieren, vgl. [Dittes 2012, S. 136], die Zerlegung des komplexen, mehrstufigen Ausgangsproblems in die jeweiligen einstufigen Flowshop-Probleme (je Produktionsstufe). Dazu ermittelt das prädikative Planungsmodul vorab die Stufenanzahl des vorliegenden

Produktionssystem. Für jedes entstandene Teilproblem erfolgt nun eine separate Betrachtung. Das stufenindividuelle Vorgehen ermöglicht dabei die Auswahl von bestmöglich auf das (Teil-) Problem abgestimmten Verbesserungsverfahren. Für Feinplanungsverfahren, die einen ganzheitlichen Problemlösungsansatz verfolgen, ist dieser Schritt nicht notwendig. Nachdem alle relevanten Daten sowie das vorliegende Planungsproblem analysiert worden sind, werden die einzusetzenden Feinplanungsverfahren ausgewählt und entsprechend initialisiert. Bei der sich anschließenden Ausführung ist darauf zu achten, dass Verfahren mit dem Prinzip „Teile und Herrsche“ ein sukzessives Vorgehen einhalten, da die Planungsergebnisse der vorherigen als Input in die sich anschließende Produktionsstufe eingehen. Im Anschluss an die Ermittlung der Teilbelegungspläne werden diese für die Zielfunktionswertermittlung des Gesamtproblems zusammengeführt. Alle ermittelten Belegungspläne einschließlich der dazugehörigen Zielfunktionswerte werden dem zentralen Steuerungsmodul übergeben. Der ermittelte, initiale Belegungsplan mit dem besten Zielfunktionswert wird ausgewählt und an die Datenbank übermittelt. Damit ist die erste, prädikative Phase der Produktionsfeinplanung abgeschlossen. Auch alle anderen Belegungsplanvarianten werden in der Datenbank (als nicht aktiv) zu Auswertungszwecken abgelegt.

#### *Prädikative Planung in der Elektronikfertigung*

Die (investitionsintensive) SMD-Fertigung bildet bei nahezu allen EMS-Dienstleistern die erste Produktionsstufe der Fertigung elektronischer Baugruppen. Zur Bestimmung des vorliegenden Problems erfolgt zu Beginn die Auswertung der relevanten Prozessdaten (beispielsweise Art und Anzahl der parallelen Linien oder Transport-, Rüst- und Bearbeitungszeiten). Im Normalfall existieren mehrere parallele, heterogene SMD-Linien mit unterschiedlichen Bearbeitungs- und Rüstzeiten sowie abweichenden Leistungs- und Qualitätsmerkmalen. Stördaten liegen zu diesem Zeitpunkt nicht vor, die Zustände der Ressourcen sind als *frei* gegeben. Die Bedarfsdaten lassen sich in bereits zur Produktion freigegebene Aufträge ( $r_j = 0$ ) sowie in Aufträge, die erfasst, aber noch nicht zum Zeitpunkt  $t_0$  freigegeben sind ( $r_j \neq 0$ ), einteilen. Gemäß dem gesamtheitlichen Vorgehen der entwickelten Feinplanungsverfahren (Kapitel 5) bildet die ermittelte Lösung des Flow-Shop-Problems der SMD-Fertigung die Grundlage für die sich anschließende zweite Stufe. Oft schließt sich an die SMD-Fertigung eine optische Inspektion (AOI) der Baugruppen an, welche wiederum durch parallel eingesetzte, heterogene Maschinen umgesetzt wird. Weitere Produktionsprozesse folgen (vgl. Abschnitt 2.7) und können nach dem gleichen Muster analysiert und mit einbezogen werden.

### **4.4 Reaktive Planung zur Plananpassung**

Die Berücksichtigung von kurzfristig auftretenden Störungen bei komplexen HFS-Problemstellungen wurde bisher in der Literatur weitestgehend vernachlässigt (vgl. Abschnitt 2.8.1). Praxisnahe Problemstellungen werden jedoch maßgeblich durch unvorhergesehene, plötzlich auftretende Änderungen beeinflusst. Die echtzeitbasierte Reaktion auf diese Störungen steht im Vordergrund des folgenden Abschnitts, welche damit eine Erweiterung der bisher bekannten Planungskonzepte darstellt.

#### **4.4.1 Störungsmanagement**

Treten während der Produktion Abweichungen zum initial ermittelten Produktionsplan auf, startet die zweite, reaktive Phase des Planungskonzeptes. Gemäß der definierten vier Störungsarten (vgl. Abschnitt 3.1) erfolgt dabei eine differenzierte Herangehensweise. Während Veränderungen des



Kapazitätsangebotes sowie der Kapazitätsnachfrage grundsätzlich eine Neuplanung der direkt und indirekt betroffenen Produktionsstufen implizieren, wird bei Störungen des zeitlichen IST- zum Planverlauf zunächst eine Prüfung durchgeführt, ob eine Neuplanung der entsprechenden Bereiche notwendig oder sinnvoll erscheint. Abbildung 4.7 veranschaulicht das prinzipielle Vorgehen.

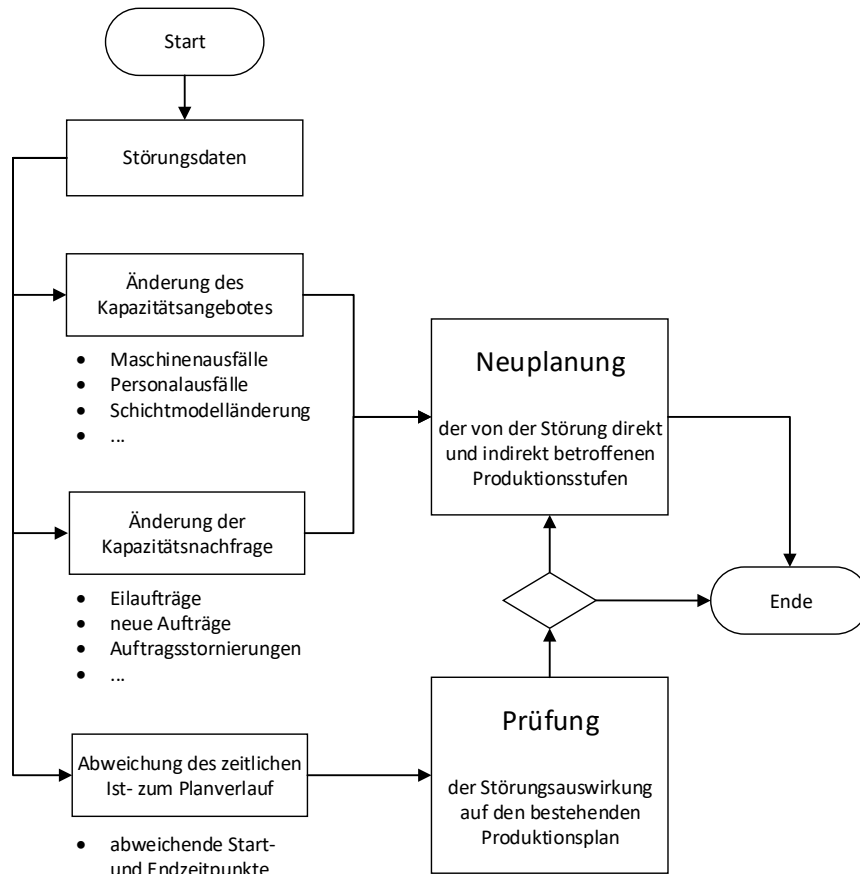


Abbildung 4.7: Handhabung unterschiedlicher Störungsarten während der Produktion

#### *Reaktive Planung bei Änderungen der Kapazitätsnachfrage bzw. des Kapazitätsangebots*

Während der laufenden Produktion ist es notwendig, auf veränderte (Kapazitäts-) Gegebenheiten zeitnah zu reagieren. Diese können in *Kapazitätsnachfrageänderungen* und *Kapazitätsangebotsänderungen* eingeteilt werden. Gelangt beispielsweise ein neuer, freigegebener Auftrag in den Auftragspool, erfolgt umgehend eine Neuplanung des bestehenden Produktionsplans, um etwaige Synergien nutzen zu können, die aufgrund von familienbasierter (und damit rüstzeitverbesserter) Produktionsreihenfolge entstehen können. Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass jeder freigegebene Auftrag umgehend einen geplanten Fertigstellungstermin erhält. Auch die Reduzierung der Kapazitätsnachfrage, d. h. die Stornierung von ein oder mehreren freigegebenen Aufträgen, führt sofort zu einer Neuplanung, damit die freigewordenen Ressourcen wieder bestmöglich verplant werden können. Eine Anpassung des Kapazitätsangebots im Produktionsalltag gehört zur gängigen Praxis, indem u. a. Veränderungen am Schichtsystem vorgenommen werden. Besteht etwa eine erhöhte Auftragslage, können ungenutzte Schichten aktiviert werden (beispielsweise durch die Umstellung von Zwei- auf Dreischichtbetrieb). Auch dieses Vorgehen führt umgehend zu einer Neuplanung der Produktion. Kapazitätsangebotsreduzierungen können hingegen geplant

(Schichtreduzierung) und ungeplant (etwa durch den Ausfall einer Maschine) auftreten. Erkennt das zentrale Steuerungsmodul eine diesbezügliche Abweichung, wird auch in diesem Fall das reaktive Planungsmodul zwecks Neuplanung aktiviert.

#### *Reaktive Planung bei Abweichungen des zeitlichen Ist- zum Planverlauf*

Während der Produktion führt das zentrale Steuerungsmodul einen kontinuierlichen Abgleich der Planungs- mit den real gemeldeten Ereignisdaten durch. Die Grundlage dafür bildet der aktuell aktive Produktionsplan, der alle geplanten Ereignisse, beispielsweise Start- und Endzeitpunkte von Aufträgen an Maschinen oder Auftragsreihenfolgen der zukünftigen Produktion beinhaltet. Tritt eine zeitliche Abweichung auf, wird geprüft, ob daraus weitere Auswirkungen auf den bestehenden Plan entstehen. Verschiebt sich beispielsweise ein Bearbeitungsendzeitpunkt eines Auftrags, könnte dies zu einem verzögerten Start nachgelagerter Aufträge an der Maschine führen. Es besteht die Möglichkeit, dass der gesamte Produktionsplan (ab der betroffenen Stufe) nicht mehr einzuhalten ist und somit unzulässig wird. Ist hingegen der nachfolgende Auftrag später eingeplant als die erkannte Verzögerung des Vorgängerauftrags, behält der Plan weiterhin seine Gültigkeit für diese Produktionsstufe. Zusätzlich muss überprüft werden, inwieweit die (Teil-)Produktionspläne nachfolgender Produktionsstufen betroffen sein könnten. Nach Beendigung der Analyse erfolgt die Entscheidung, ob und wenn ja ab welcher Produktionsstufe eine Neuplanung gestartet wird. In der Praxis treten viele sog. Microstörungen auf, die den zeitlichen Verlauf vieler Aufträge (oft nur minimal) verändern. Eine kontinuierliche Bewertung dieser Kleinstabweichungen ist erforderlich, um daraus resultierende größere Störungen frühzeitig zu erkennen und diesen ggf. gegenzusteuern.

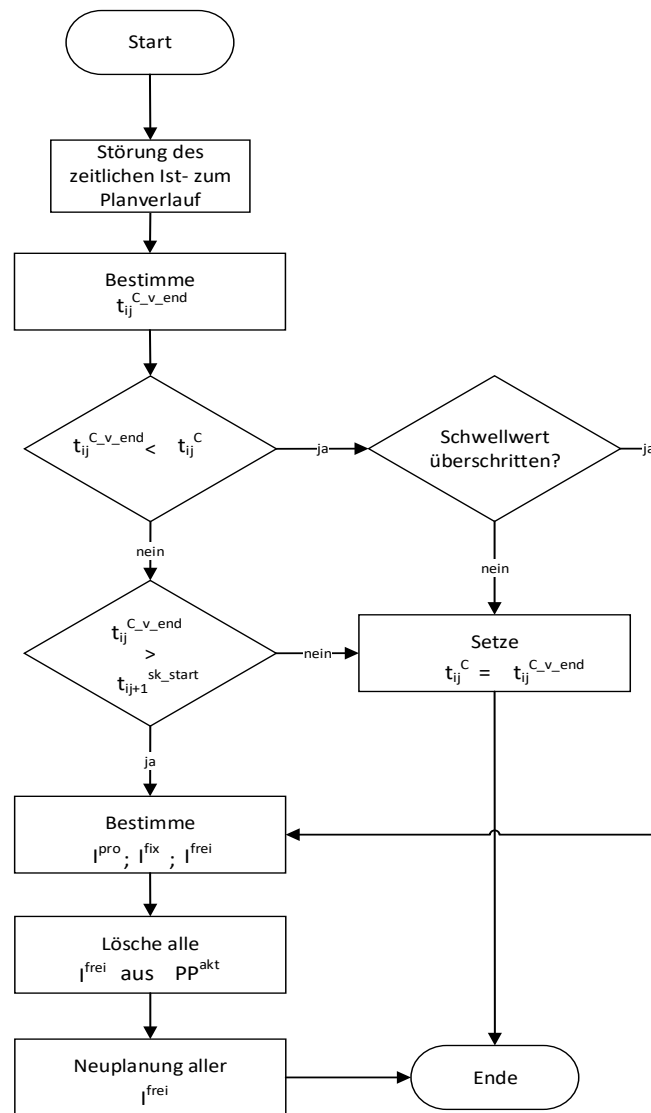


Abbildung 4.8: Ablaufschema beim Auftreten von Störungen des zeitlichen Ist- zum Planverlauf

Die folgenden Symbole und Formelzeichen werden zur Beschreibung verwendet:

$t^{akt}$	aktueller Zeitpunkt
$t_{ij}^{pro\_start}$	Produktionsstartzeitpunkt des Auftrags $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^C$	Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^{C\_v\_start}$	Startzeitpunkt der Verzögerung des Auftrags $j$ an Maschine $i$
$t_{ij}^{C\_v\_end}$	Endzeitpunkt der Verzögerung des Auftrags $j$ an Maschine $i$
$t_{ij+1}^{sk\_start}$	Starttermin des Rüstprozesses des nachfolgenden Auftrags $j+1$ an Maschine $i$
$t_{ij+1}^{sk\_end}$	Endtermin des Rüstprozesses des nachfolgenden Auftrags $j+1$ an Maschine $i$
$i \in I^{prod}$	Menge aller gerade produzierter Aufträge
$i \in I^{fix}$	Menge aller fixierten Aufträge
$i \in I^{frei}$	Menge aller frei verplanbaren Aufträge
$pp^{akt}$	aktuell gültiger Produktionsplan

Wie Abbildung 4.8 zeigt, erfolgt nach der Identifizierung einer zeitlichen Abweichung zuerst die Bestimmung des neuen Endzeitpunktes  $t_{ij}^{C-v.end}$  der erkannten Störung. Der sich anschließende Vergleich mit dem ursprünglich geplanten Fertigstellungszeitpunkt zeigt, ob eine Verzögerung ( $t_{ij}^{C-v.end} > t_{ij}^C$ ) oder eine Beschleunigung ( $t_{ij}^{C-v.end} < t_{ij}^C$ ) des geplanten Fertigstellungszeitpunktes vorliegt. Um die Potentiale einer Beschleunigung nutzen zu können, erfolgt eine Neuplanung der betroffenen Areale, wenn ein bestimmter Schwellwert überschritten wird. Liegt hingegen eine Verzögerung vor, wird untersucht, ob der Starttermin des nachfolgenden Auftrags  $t_{ij+1}^{sk.start}$  beeinträchtigt wird. Ist dies nicht der Fall, wird der neue (verzögerte) Fertigstellungstermin des Auftrags gespeichert. In diesem Fall ist eine Neuplanung der betroffenen Produktionsstufe nicht notwendig. Weiterhin wird überprüft, ob die Verzögerung des Auftrags die nachfolgende Stufenplanung beeinträchtigt und somit ggf. neu geplant werden muss. Das folgende Beispiel soll den prinzipiellen Ablauf bei einer zeitlichen Störung verdeutlichen. Gegeben sei ein aktiver Produktionsplan für eine Produktionsstufe mit drei Maschinen (Abbildung 4.9). Heterogene Rüst- und Produktionszeiten bilden die Grundlage der Planung. Zum Zeitpunkt  $t^{akt} = t_2^C$  wird eine zeitliche Störung erkannt. An der Maschine  $M_3$  entsteht eine Verzögerung des Bearbeitungsendzeitpunktes von Auftrag  $j_2$ , der ursprünglich geplante Fertigstellungszeitpunkt  $t_2^C$  kann nicht gehalten werden. Eine fundierte Entscheidung zu diesem Zeitpunkt zum weiteren Vorgehen lässt sich nur treffen, wenn die Dauer der Verzögerung bzw. der neue Fertigstellungszeitpunkt  $t_2^{C-v.end}$  von Auftrag  $j_2$  möglichst genau ermittelt wird. Dazu fordert das zentrale Steuerungsmodul die notwendigen Informationen aus der Datenbank (beispielsweise den realen Produktionszustand des Auftrags oder die aktuell benötigte Bearbeitungszeit an der Maschine) an und bestimmt die voraussichtliche Dauer. Führt die berechnete Verzögerung zu keiner Beeinträchtigung nachfolgender Auftragsstartzeitpunkte, erfolgt lediglich die entsprechende Anpassung des betroffenen Auftrags. Eine Neuplanung dieser Produktionsstufe wird nicht erforderlich. Ist jedoch wie in Abbildung 4.9 aufgeführt der neue Fertigstellungszeitpunkt (hier  $t_2^{C-v.end}$ ) größer als der Startzeitpunkt des Folgeauftrags ( $t_7^{sk.start}$ ), liegt die Notwendigkeit einer Neuplanung dieser sowie aller nachfolgend betroffenen Produktionsstufen vor.

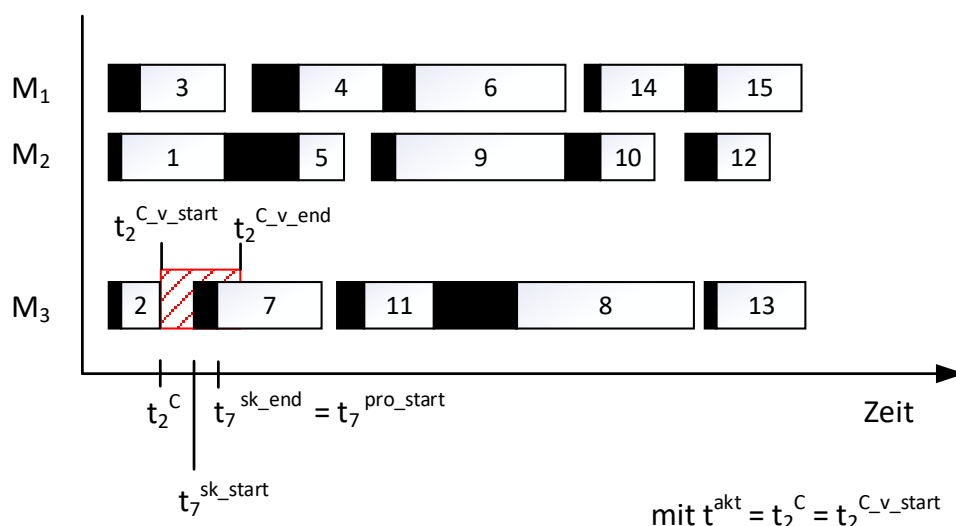


Abbildung 4.9: Beispiel eines Produktionsplans  $PP$  mit einer zeitlichen Störung

#### 4.4.2 Prinzip der reaktiven Phase

Erfasst das zentrale Steuerungsmodul während des Abgleichs eine Abweichung von realen Produktionsdaten zum aktuell gültigen Produktionsplan, die eine Neuplanung bedingt, wird die reaktive Phase der Produktionsfeinplanung gestartet. Diese beginnt mit der Erhebung aller zur Planung notwendigen Daten aus der zentralen Datenbank. Anschließend ermittelt das zentrale Steuerungsmodul die Areale des bestehenden Produktionsplans, die aufgrund der aufgetretenen Änderung nicht mehr aktuell sind und neu geplant werden müssen. Für die Zeit der Neuplanung wird der aktuelle Produktionsplan  $PP^{akt}$  in den temporären Produktionsplan  $PP^{akt-t}$  überführt. Dazu werden alle frei planbaren Produktionsaufträge der betroffenen Produktionsstufen aus  $PP^{akt}$  entfernt und in den (wieder) zu verplanenden Auftragsvorrat überführt. Sich gerade in der Produktion befindende sowie fixierte Aufträge kommen für die Neuplanung nicht in Betracht und bilden als Restriktion die Ausgangsbasis der zukünftigen Planung. Der jetzt temporär gültige Produktionsplan wird der Datenbank bereitgestellt und somit direkt an die operativen Mitarbeiter der Produktion weitergegeben, die nun eine eingeschränkte Sicht zur Verfügung haben. Zu diesem Zeitpunkt ist es folglich nur noch möglich, gerade produzierte sowie fixierte Aufträge zu bearbeiten. Um Stillstände aufgrund einer fehlenden weitergehenden Planung zu vermeiden, muss die Neuplanerstellung möglichst echtzeitnah erfolgen. Das zentrale Steuerungselement leitet die dazu notwendigen Informationen an das reaktive Planungsmodul weiter. Im Unterschied zur prädikativen kommt die reaktive Planung während der laufenden Produktion zum Einsatz, woraus sich weitere Anforderungen ergeben. Obwohl ein dynamisches Umfeld vorliegt, erfolgt eine statische Problembetrachtung, bei der alle Daten und Informationen genutzt werden, die zu diesem Zeitpunkt vorliegen. Fixierte und sich gerade auf der Maschine befindende Aufträge ( $p^{fix}$ ;  $p^{prod}$ ) bilden hierbei Restriktionen, die von den Feinplanungsverfahren berücksichtigt werden müssen. Nach der Analyse der Ausgangssituation werden die vorgesehenen Verfahren zur Feinplanung gemäß der ermittelten Problemstellung ausgewählt und initialisiert. Auch das reaktive Planungsmodul setzt dabei Verfahren ein, die unterschiedliche Lösungssystematiken verfolgen. Je nach Art wird das Problem dafür entweder in seine Produktionsstufen zerlegt oder ganzheitlich betrachtet. Identisch zum prädikativen Planungsmodul werden nach der Ausführung der unterschiedlichen Feinplanungsverfahren ggf. die sukzessiv ermittelten Teilpläne konsolidiert und anschließend durch die Integration der nicht neu geplanten Bereiche des ursprünglichen Plans zu einer neuen Gesamtplanvariante zusammengefügt. Alle neu ermittelten Planvarianten werden anschließend an das zentrale Planungsmodul übergeben, welches umgehend die Variante mit dem höchsten Zielwert auswählt und der Datenbank als neuen aktuellen Produktionsplan  $PP^{akt}$  bereitstellt. Dieser löst damit den temporären Produktionsplan  $PP^{akt-t}$  ab, der als inaktiv abgelegt wird. Der neu ermittelte, aktuelle Produktionsplan steht anschließend allen Nutzern zur Verfügung und bildet gleichzeitig die Grundlage des permanenten Soll-Ist-Vergleichs des zentralen Steuerungsmoduls. Abbildung 4.10 stellt den allgemeinen Ablauf einer reaktiven Planänderung dar.

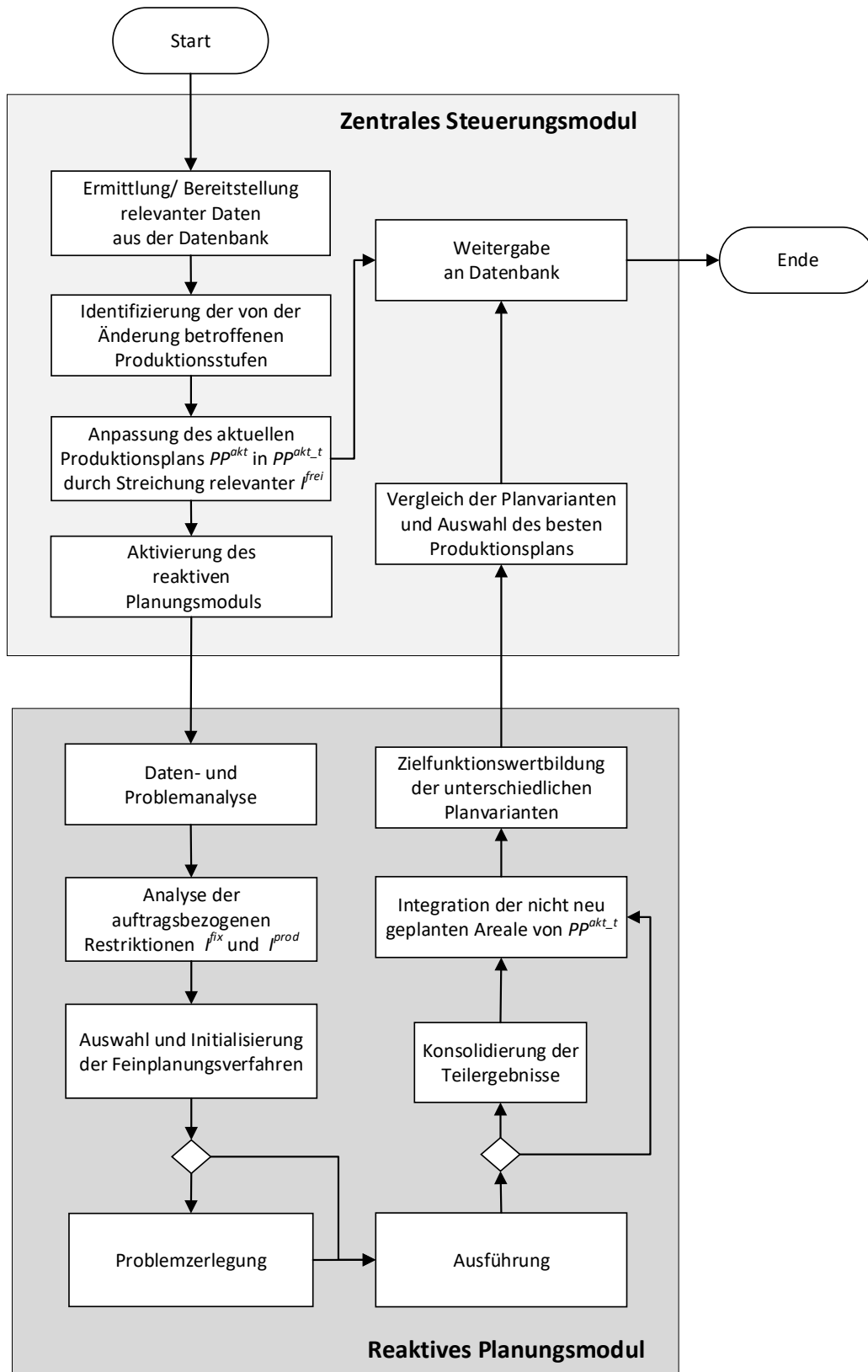


Abbildung 4.10: Ablauf einer reaktiven Planänderung

## 4.5 Analyse- und Visualisierungsfunktionen

Neben der Bereitstellung des bestmöglichen Produktionsplans soll das entwickelte Feinplanungssystem zudem die gängigen Analyse- und Visualisierungsfunktionen eines modernen Leitstandes beinhalten. Die Anbindung der zentralen Datenbank an das Steuerungsmodul bildet die Grundlage des Vorhandenseins aller relevanten Ist- und Plan-Daten. Die aktuell in der Produktion eingesetzten Leitstände bieten schon heute eine Vielzahl dieser hilfreichen Funktionen. Daher ist es nicht das Ziel dieser Arbeit, neue Analyse- und Visualisierungsfunktionen zu entwickeln, sondern bereits bestehende in das Konzept der echtzeitnahen Fertigungsfeinplanung einer Hybrid-Flow-Shop – Produktion zu integrieren. Dafür erscheint es sinnvoll, eine Trennung zwischen Offline- und Istzeit-Modus vorzunehmen. Grundsätzlich bildet das zentrale Steuerungselement die Schnittstelle zu den zugriffsberechtigten Benutzern.

### *Offline-Modus*

Startet der Benutzer (Planer, Controller,...) diesen Modus, hat er die Möglichkeit, mit Hilfe von Plantafeln, Tabellen und Diagrammen die unterschiedlichen Planungsdaten (z. B. Feinplanungsvarianten) miteinander zu vergleichen, um Rückschlüsse für ein zukünftiges Vorgehen bzw. Erkenntnisse über das Prozessverhalten zu ziehen. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, verschiedene „Was-Wäre-Wenn-Szenarien“ zu konstruieren und vergleichen zu lassen, indem beispielsweise Änderungen an Ressourcen (z. B. Stilllegung einer Maschine), Aufträgen (z. B. Anzahl oder Priorität) oder Produktionsstrukturen (z. B. Wegfall einer Produktionsstufe) vorgenommen werden können. Damit ist es im Vorfeld einer geplanten Änderung möglich, die zu erwartende Auswirkung auf die Produktion aufzuzeigen und vorauszuplanen. Beispiele hierfür können die Erwägung einer Kapazitätserweiterung durch die Investition in eine neue Maschine oder die Annahme eines größeren Kundenauftrags mit hoher Priorisierung sein. Die Ergebnisse werden echtzeitnah generiert und zur Verfügung gestellt. Eine umgehende, fundierte Entscheidungsvorlage wird damit gewährleistet.

### *Istzeit-Modus*

Durch das Aufrufen des Istzeit-Modus stehen dem Benutzer detaillierte Informationen über den aktuellen Stand der Produktion zur Verfügung. In diesem Bereich ist es nicht möglich, direkt in den Planungsprozess einzugreifen. Dieser Modus dient allein der Ansicht und Information. Beispielsweise können durch den Aufruf eines Prozessmonitors aktuelle Messdaten der Produktion angezeigt werden, die einen Rückschluss auf den Ist-Stand geben. Aktuelle Ereignisse wie Störungen, Auftragsrückmeldungen oder durchgeführte Aktualisierungen der Feinplanung können echtzeitnah verfolgt und bewertet werden. Ziel ist es, dem Benutzer jederzeit den aktuellen Stand der Produktion sowie der weiteren Produktionsfeinplanung übersichtlich und faktenbasiert darzulegen, um einen homogenen Wissensstand aller Beteiligten zu gewährleisten.

## 4.6 Zusammenfassung

Derzeit eingesetzte Feinplanungssysteme stoßen bei komplexen Produktionsumgebungen schnell an ihre Grenzen und können den bestehenden Anforderungen oft nur unzureichend gerecht werden (vgl. Kapitel 2). Der Planer als alleiniger Systemsteuerer, Plan-Verbesserer und Entscheider, der durch diverse IT-Anwendungen unterstützt wird, kann seiner Rolle im dynamischen Umfeld nicht gerecht

werden. Qualitativ schlechte, verzögerte oder nicht getroffene Entscheidungen resultieren daraus. Im Bereich der Fertigungsfeinplanung müssen möglichst gute Maßnahmen synchron zur laufenden Produktion eingeleitet werden, um jederzeit den bestmöglichen Ablauf zu gewährleisten. Komplexe Produktionssysteme erzeugen zudem eine enorme Anzahl an Informationen, die bisher nur ansatzweise genutzt werden und damit lediglich sporadisch in die Entscheidungsfindung mit eingehen. Grundsätzlich stellt die vorgestellte Methodik zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion einen Paradigmenwechsel dar. Der Planer wird durch ein weitestgehend selbstständig agierendes Feinplanungssystem abgelöst und tritt in den Hintergrund, auch wenn er weiterhin für die Planung bzw. Planerstellung im unternehmerischen Sinn verantwortlich bleibt. Das Gesamtkonzept schließt dabei alle am Produktionsprozess direkt und indirekt beteiligten Akteure ein. Diese sind über ein Netzwerk miteinander verbunden, wobei alle relevanten Informationen in einer zentralen Datenbank abgelegt sind und jedem (berechtigtem) Akteur zur Verfügung stehen. Die direkte Anbindung der operativen Automatisierungsebenen (Ebene 2, 1 und 0) an das Netzwerk führt dabei zu einem zeitverlustfreien Informationstransfer an die ausführenden Bereiche. Das beschriebene, selbstständig agierende Feinplanungssystem stellt ein Kernelement der entwickelten Methodik dar. Das darin enthaltene zentrale Steuerungselement bildet die Schnittstelle zum Netzwerk, sowie zu den prädikativen und reaktiven Planungsmodulen. Die in Kapitel 2.8.3 beschriebenen Anforderungen an zukünftige Systeme und Verfahren zur Unterstützung der Fertigungsfeinplanung sollen im Folgenden anhand des vorgestellten Systems bewertet werden. Die *Handhabung von Unsicherheiten*, die sich aus einer unvollständigen Informationslage ergibt, löst das vorliegende Konzept durch die Integration von prädikativen und reaktiven Planphasen. Maßgeblich dabei ist die systemtechnische Abbildung der reaktiven Phase und die daraus resultierende automatische Entscheidungsfindung im laufenden Produktionsprozess. Kurzfristig auftretende Änderungen werden im Rahmen des eingeführten Störungsmanagements umgehend aufgezeigt und bewertet. Die permanente Überprüfung und ggf. Anpassung des aktuellen Produktionsplans führt damit zu einem *robusten Verhalten* des Gesamtsystems im *dynamischen Umfeld*. Das vorliegende Datenkonzept stellt die Grundlage einer erfolgreichen Umsetzung der vorgestellten Lösung dar. Neben der Informationsaufnahme und -speicherung liegt der Fokus auf der *Verarbeitung der vorliegenden Informationen*. Durch die Automatisierung des Feinplanungssystems werden alle relevanten Daten in die Entscheidungsfindung mit einbezogen und zeitgerecht verarbeitet. Zusätzlich können vergangene Daten jederzeit zu Auswertungs- und Analysezwecken aufgerufen werden. Wie in Kapitel 2.8 beschrieben, kann ein Abbau der inneren Komplexität im Rahmen des *Komplexitätsmanagements* negative Folgen auf das Unternehmen haben. Ziel des neuen Ansatzes ist daher die bestmögliche Beherrschung der bestehenden Komplexität. Durch den Einsatz von unterschiedlichen, aufeinander abgestimmten IT-Systemen und flexiblen Feinplanungsverfahren besteht die Möglichkeit, individuell und problemspezifisch auf die variierenden Anforderungen reagieren zu können. Trotz der hohen Komplexität sind gute Lösungen in der benötigten Zeit möglich. Obwohl die Reaktion auf veränderte Bedingungen zukünftig automatisiert über das Feinplanungssystem erfolgt, besitzt der *Benutzer (z.B. Planer)* über Schnittstellen die Möglichkeit, *indirekt eingreifen* zu können. Beispielsweise lässt sich die Auftragsreihenfolge durch Anpassung der Priorisierung verändern oder die Belegung der Maschinen durch Änderung der Arbeitspläne anpassen. Die somit erzeugte Störung führt umgehend zu einer Bewertung und ggf. Aktualisierung des bestehenden Produktionsplans durch das Feinplanungssystem. Das (oft willkürliche) Ändern des Produktionsplans durch den Benutzer (Planer oder Maschinenbediener) ist nicht möglich, damit das Gesamtsystem vor den potenziell negativen Auswirkungen geschützt wird. Ein hierarchisches Benutzerkonzept regelt zusätzlich die Berechtigungen der Anwender, die durch ihren Eingriff in die Planungsdaten einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die vorgestellte Planüberprüfung und ggf. Plananpassung steht einer gewünschten hohen Planstabilität teilweise konträr gegenüber. Daher prüft das zentrale



Steuerungsmodul des vorgestellten Feinplanungssystems vor jeder reaktiven Planänderung die betroffenen Areale des bestehenden Produktionsplans. Oft kommt es anschließend nur zu einer *partiellen Planänderung*. Dieses modulare Vorgehen wirkt sich positiv auf die Planstabilität aus. Automatisierte, computergestützte Planungsergebnisse, die mit Hilfe von digitalisierten Produkten, Prozessen und Systemen generiert werden, bilden zukünftig die Grundlage der Produktionsfeinplanung. Die für die Übertragung dieser Daten auf die reale Produktion notwendige *Modellgenauigkeit* muss dabei zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein. Dazu ist es notwendig, eine entsprechend ausgebildete IT-Abteilung einzubinden. Derzeit eingesetzte Feinplanungssysteme werden durch den Benutzer (Planer) angepasst, der oft mit dieser Tätigkeit überfordert ist. Eine ungenügende Übertragbarkeit der generierten Pläne auf die Realität ist die Folge. Fortan obliegen Änderungen bzw. Anpassungen des Modells einzig den IT-Spezialisten. Durch die Anbindung der Akteure an das zentrale Netzwerk können relevante Anforderungen direkt weitergeleitet und bearbeitet werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das vorgestellte System zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion die aufgezeigten Anforderungen grundsätzlich erfüllt und somit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Fertigungsfeinplanung liefert. Ein sinnvoller Einsatz ist jedoch nur möglich, wenn geeignete (Problem-) Lösungsverfahren integriert werden. Die aktuell bekannten Feinplanungsverfahren zur Lösung von komplexen HFS-Problemen haben große Defizite bezüglich ihrer Lösungsgüte bzw. benötigter Rechenzeit (vgl. Kapitel 3.3.3). Rechenzeitintensive Verfahren sind für den produktionssynchronen Einsatz nicht sinnvoll einzusetzen, da die Lösung echtzeitnah vorliegen sollte. Schnelle, sehr einfache Verfahren erzeugen oft qualitativ schlechte oder unausführbare Pläne, die durch den Benutzer manuell verändert werden müssen (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Entwicklung neuer Feinplanungsverfahren zur Lösung einer HFS-basierten Produktion, die den Anforderungen an eine echtzeitfähige Fertigungsfeinplanung gerecht werden, stellt den zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Das folgende Kapitel 5 widmet sich diesem Thema ausführlich.

## 5 Das MISO – Verfahren

In Kapitel 4 wurde zur Lösung der vorliegenden Problemstellung eine neue Methodik zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion vorgestellt. Die erfolgreiche Implementierung kann jedoch nur gelingen, wenn geeignete Feinplanungsverfahren zum Einsatz kommen. Die umfassende Literaturrecherche in Kapitel 3 zeigt, dass aktuell keine im Kontext der vorliegenden Problemstellung sinnvoll anzuwendenden Feinplanungsverfahren existieren. Ziel dieses Kapitels ist es daher, neue Feinplanungsverfahren zu entwickeln, die der vorliegenden Problemstellung gerecht werden. Wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, konnte an einfachen HFS-Problemstellungen aufgezeigt werden, dass durch die Kombination von Simulation und heuristischen Optimierungsalgorithmen gute Lösungen in einer kurzen Zeit möglich sind. An dieser Stelle setzt die Arbeit an. Die vorliegende, praxisnahe Problemstellung weist dabei erhebliche Unterschiede bezüglich Komplexität und Allgemeingültigkeit zu den bisher betrachteten Aufgabenstellungen auf. Das entwickelte Verfahren der **Modular Integrierten Simulationsbasierten Optimierung (MISO)** ist konzipiert worden, um diesen (realitätsnahen) Anforderungen besser gerecht zu werden. Neben der wissenschaftlichen Lösung komplexer HFS- Problemstellungen besteht ein weiteres Ziel in der Implementierung in reale Produktionsumgebungen.

In Abschnitt 5.1 wird zunächst eine allgemeine Problemdefinition durchgeführt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.2 eine grundlegende Beschreibung des neuen Verfahrens, welche neben dem gesamtheitlichen Überblick (Abschnitt 5.2.1) vorrangig die miteinander agierenden Algorithmen (Abschnitt 5.2.2 und 5.2.3) umfasst. Die im entwickelten Simulationsmodell eingesetzten unterschiedlichen Simulationsarten werden in Abschnitt 5.3 erläutert. Eine Zusammenfassung (Abschnitt 5.4) schließt das Kapitel 5 ab.

### 5.1 Problemdefinition

Das allgemeine Ausgangsproblem soll nachfolgend näher beschrieben werden:

- Es sei  $J_j \in \{J_1, \dots, J_n\}$  eine Menge von  $n$  Jobs ( $j = 1, \dots, n$ ), die geplant werden müssen.
- Es sei  $S_j \in \{S_1, \dots, S_n\}$  eine Menge von  $s$  Produktionsstufen ( $s = 1, \dots, n$ ), die eine Menge  $M_s$  heterogener paralleler Maschinen enthalten.
- Es sei  $M_i, s \in M_s = \{M_1, \dots, M_{ms}\}$  eine Maschine, die zur Menge  $M_s$  von  $m$  Maschinen auf Stufe  $s$  gehört ( $i \in \{1, \dots, ms\}$ ).
- Es sei  $O_j = \{O_1, \dots, O_o\} : \forall o \in \{2, \dots, 4\}$  eine Reihe von Operationen, die auf den entsprechenden Stufen ausgeführt werden müssen, um einen Job  $J_j$  abzuschließen.
- Es seien  $d_j$  ( $d_j \in \{1, \dots, 21\}$ ) die Tage bis zum Fälligkeitsdatum eines Jobs  $J_j$ .
- Es sei  $p_{i,j,s} \in R_+$  die Bearbeitungszeit, um eine Operation  $O_{sj}$  an einem Job abzuschließen, der auf einer Maschine  $M_{i,s}$  der Produktionsstufe  $s$  verarbeitet wird.
- Es sei  $F_{i,s} \subset T, \cup F_{i,s} = T, F_{i,s} \cap F_{j,s} = \emptyset, i \neq j$  eine Familie der Produktionsstufe  $s$ .
- Es sei  $\beta = s_{s,g,h}$  die erforderliche Einrichtungszeit zum Rüsten und Konfigurieren der Maschine  $M_i$  auf einer Produktionsstufe  $s$ .
- Es sei  $\alpha = \{HFS\}$  ein allgemeines Hybrid-Flow-Shop Planungsproblem.

- Es sei  $\gamma_1 = C_{max}, maxC_j: \forall J_j (j \in \{1, \dots, n\})$  die Zykluszeit des zuletzt abgeschlossenen Jobs  $J_j$  aus der Menge aller geplanten Jobs.
- Es sei  $\gamma_2 = \bar{T}, \bar{T} = (\sum_{j=1}^n T_j) / (\sum_{j=1}^n U_j): \forall J_j (j \in \{1, \dots, n\})$  die durchschnittliche Verspätung aller Jobs.
- Es sei  $\gamma_3 = U, U = \sum_{j=1}^n U_j: \forall J_j (j \in \{1, \dots, n\})$  die Anzahl verspäteter Aufträge.
- Es sei  $\gamma_4 = MS_1, MS_1 = \sum_{j=1}^n MS_{1j}: \forall J_j (j \in \{1, \dots, n\})$  die benötigte Anzahl an Hauptrüstungen der ersten (SMD-) Stufe, die zur Bearbeitung aller Jobs notwendig sind.
- Es sei  $\mathbb{H}$  die Menge aller möglichen Zeitpläne für eine Reihe von Jobs  $J_j$ .

Weiterhin sollen die folgenden Regeln gelten:

- Die Menge der Operationen  $O_j = \{O_1, \dots, O_o\}$  zur Bearbeitung eines Jobs  $J_j$  ist voneinander abhängig und darf nicht gleichzeitig ausgeführt werden.
- Maschinen  $M_i$  können prinzipiell Leerlaufzeiten haben.
- Die Puffergrößen zwischen den Maschinen stellen keine Restriktion dar und sind als unbegrenzt anzunehmen.
- Eine Maschine  $M_i$  kann jeweils nur einen Auftrag bearbeiten.
- Aufträge durchlaufen jeweils eine Maschine  $s_i$  je Produktionsstufe  $i$ , ein Überspringen einzelner Produktionsstufen ist möglich.
- Alle als frei ermittelten Maschinen  $M_i$  sind zu Beginn der Planung verfügbar.
- Sowohl die Anzahl der Stufen  $i$  des Produktionssystems ( $i = 1, \dots, m$ ), als auch die Anzahl der parallelen Maschinen  $s_i$  ( $s_i = 1 \dots, S_i$ ) auf jeder Stufe sind beliebig.
- Die Ausprägungen von  $\alpha_1$  sind beliebig,  $\alpha_1 \in \{1, P, Q, R\}$ .

Das vorliegende, allgemeine Hybrid-Flow-Shop Problem kann damit als

$$HFS | C_{max}, \bar{T}, U, MS_1 \quad (5.1)$$

definiert werden. Die dazugehörige Zielfunktion lautet:

$$Min (C_{max}, \bar{T}, U, MS_1) \quad (5.2)$$

Ziel ist es, einen Produktionsplan  $H \in \mathbb{H}$  zu finden, bei dem

- die zu verplanende Menge an Jobs  $J_j$  auf den zur Verfügung stehenden Maschinen  $M_{s,m}$  von  $s$  Produktionsstufen zugeordnet ist,
- alle erforderlichen Operationen  $O_{oj}$  zur Vervollständigung eines jeden Jobs durchgeführt werden können sowie
- die (gewichtete) Summe der Zielgrößen Zykluszeit  $C_{max}$ , durchschnittliche Verzögerung  $\bar{T}$ , Anzahl verspäteter Aufträge  $U$  sowie Anzahl der Hauptrüstungen  $MS_1$  aller verplanten Jobs der ersten Stufe minimal ist.

Für den Ansatz zur Gewichtung der unterschiedlichen Zielkriterien gilt:

$$\gamma_1(H) = C_{max}, \gamma_2(H) = \bar{T}, \gamma_3(H) = U, \gamma_4(H) = MS_1 \quad (5.3)$$

mit

$$\min Z(H) \Leftrightarrow \min \gamma_1(H) \wedge \min \gamma_2(H) \wedge \min \gamma_3(H) \wedge \min \gamma_4(H) : \forall H \in \mathbb{H} \quad (5.4)$$

Daraus folgt

$$\underset{H \in \mathbb{H}}{\text{arc min}} Z(H) = \omega_1 * \gamma_1 + \omega_2 * \gamma_2 + \omega_3 * \gamma_3 + \omega_4 * \gamma_4 : \forall (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1) \quad (5.5)$$

mit  $\omega \geq 0$

## 5.2 Ansatz und Aufbau des MISO-Verfahren

Wie in Kapitel 3.3.3 erläutert gelang es bisher nur einfache HFS-Problemstellungen mithilfe der Kombination von Simulationstechniken und heuristischen Optimierungsalgorithmen in kurzer Zeit zu lösen. Dieses konzeptionelle Vorgehen soll als Inspiration zur Entwicklung von neuen Verfahren herangezogen, entscheidend erweitert und anschließend in die Methodik der vorliegenden Arbeit integriert werden.

### 5.2.1 Allgemeiner Überblick

Die vorliegende Problemstellung ist gekennzeichnet durch auftragsreihenfolgespezifische Rüstzeiten an den jeweiligen Maschinen der Produktionsstufen. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die zu ermittelnden Zielgrößen  $C_{max}$ ,  $\bar{T}$  und  $U$ . Aufgrund der Bedingung einer echtzeitnahen Lösungsfindung wurde die Systematik eines konstruierenden Verfahrens gewählt, vgl. Kapitel 3.3.2. Der MISO-Ansatz nutzt dabei zu Beginn die Vorgehensweise der Zerlegung des Gesamtproblems, vgl. Abbildung 5.1. Durch die anschließende Analyse der einzelnen (Teil-) Problemstellungen können Rückschlüsse für die Konfiguration des Feinplanungsverfahrens gezogen werden. Bei der anschließenden Erstellung des Modells bzw. während der Ausführung der simulationsbasierten Optimierung erfolgt grundsätzlich eine ganzheitliche Problembetrachtung.

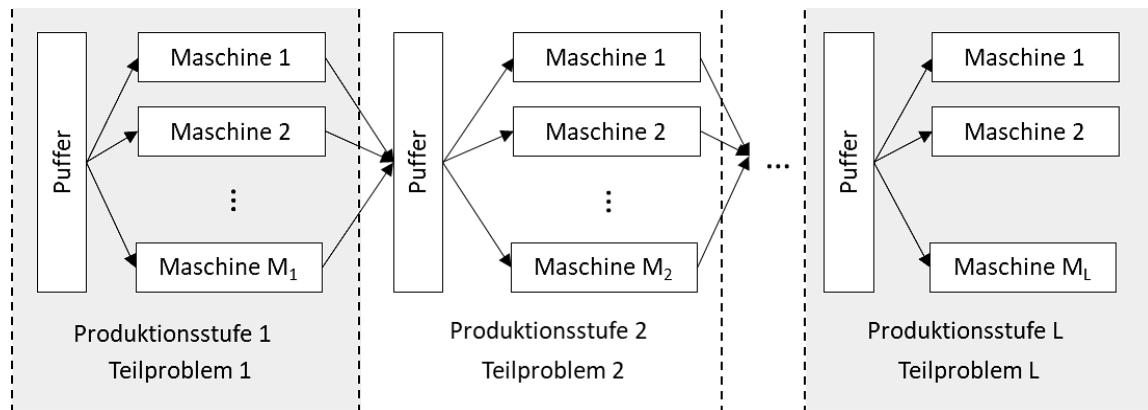


Abbildung 5.1: Produktionsstufenbasierte Zerlegung einer HFS-Produktion

Um eine möglichst hohe Qualität der Produktionspläne zu gewährleisten, werden verschiedene Simulationsarten (sequenz- und ereignisbasierte Zuweisungsprozesse der Jobs zu den Maschinen je Produktionsstufe) ausgeführt. Bezugnehmend auf die verschiedenen Parameter der Aufträge (z. B. Priorität oder Familientyp) soll eine ausgeglichene Produktionslast auf den Maschinen sichergestellt werden. Die Vorteile einer Simulation als Teil der Planungsverfahren lassen sich durch das gewählte Vorgehen bestmöglich nutzen. Die Interaktion von Sequenzierungs- und Zuordnungsalgorithmen während der Simulation, welche auf vorgegebenen Verhaltensmustern beruht, bildet die Grundlage und Kernidee des entwickelten Feinplanungsverfahrens, vgl. Abbildung 5.2. Durch Zuweisung, Freigabe oder Neuzuweisung sollen möglichst viele Aufträge einer Familie zu einer Maschine sortiert werden, ohne damit Verspätungen anderer Aufträge zu verursachen. Bevor die simulationsbasierte Optimierung erstmalig gestartet werden kann, erfolgt eine initiale Belegung der Maschinen der ersten Produktionsstufe mit den frei verplanbaren Aufträgen auf Basis ihrer Familienzugehörigkeit nach der Prioritätsregel SPT (Shortest Processing Time). Während der Simulation werden anschließend ereignisbasierte Auftragsverteilungen zu den Maschinen der zu beplanenden Produktionsstufe durch den Allokationsalgorithmus durchgeführt. Nach der anschließenden Prüfung führt der Sequenzierungsalgorithmus aufgrund festgelegter Vorgaben die Rückführung unpassender Aufträge zum zentralen Auftragspool durch. Der Allokationsalgorithmus greift diese rückgeführten Aufträge erneut auf und verteilt sie, basierend auf den nun vorliegenden Parametern System- und Maschinenlast, Familienzugehörigkeit der Aufträge sowie Fälligkeit (Priorität), in einer neuen Reihenfolge auf die Maschinen.

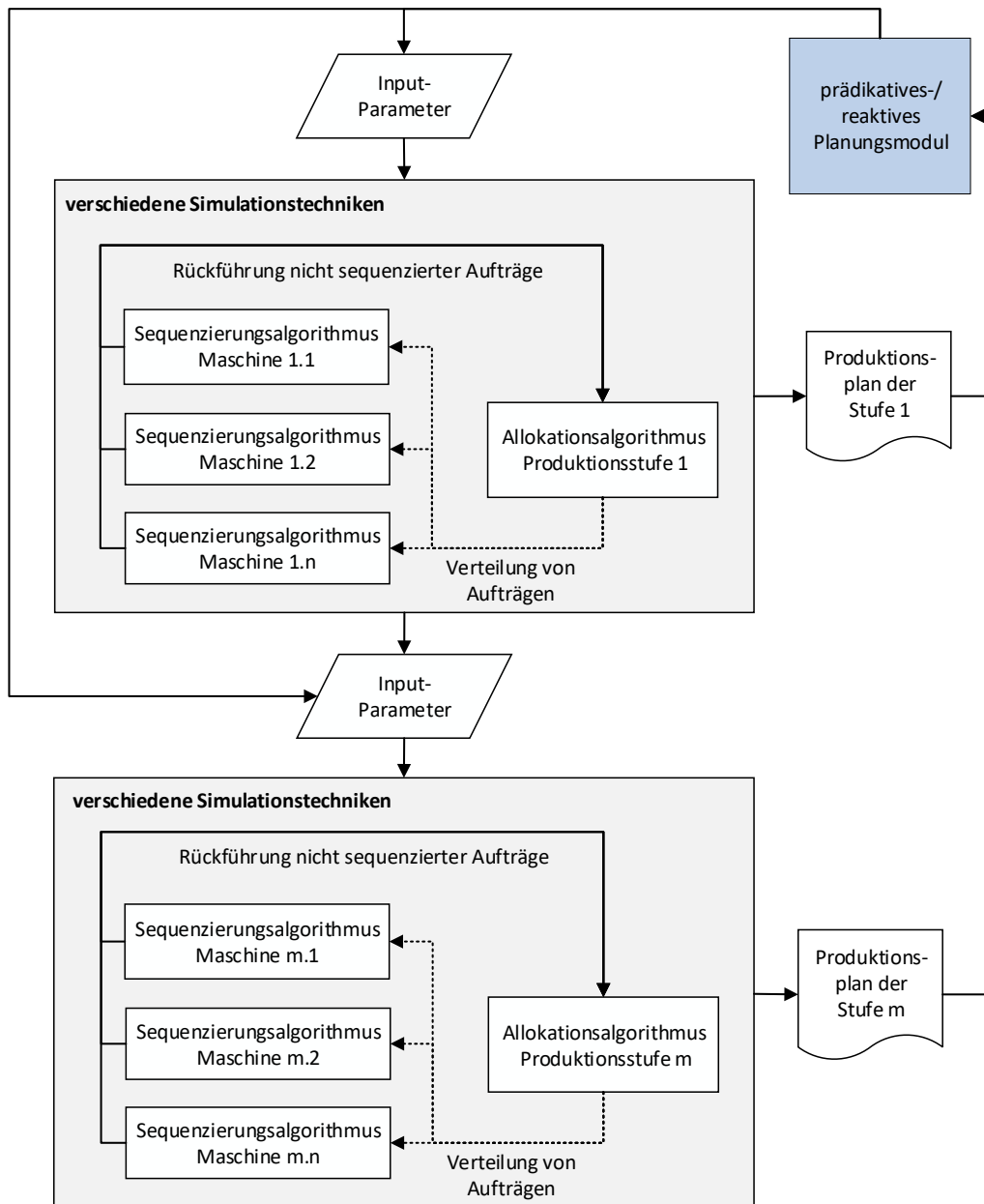


Abbildung 5.2: Verfahrensansatz der Feinplanung

Prinzipiell wird dieses Vorgehen so lange durchgeführt, bis alle Aufträge einer Maschine zugeordnet sind. Ziel ist es, ein Gleichgewicht von Produktionslast einerseits (gleichmäßige Auslastung der Maschinen zur Minimierung Gesamtzykluszeit) und Priorisierung kritischer Aufträge (Minimierung der Summe der Verspätungen), andererseits herzustellen. Die Vermeidung der Verletzung von Auftragsfälligkeitsterminen hat dabei einen negativen Einfluss auf die Rüstreihenfolge. Größere, auftragsfamilienbedingte Maschinenumrüstungen können die Folge sein.

In den folgenden Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 sollen die eingesetzten Algorithmen genauer beschrieben werden.

### 5.2.2 Der produktionsstufenbasierte Allokationsalgorithmus

Die wesentliche Funktion der Auftragsallokation besteht darin, eine möglichst ausgeglichene Auftragslast auf allen parallel eingesetzten Maschinen zu erreichen. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, soll dieses Vorgehen eine möglichst kurze Gesamtzykluszeit begünstigen. Die bevorzugte Zuteilung von Aufträgen der gleichen Familie zu einer Maschine soll dabei die Anzahl der zeitintensiven auftragsfamilienbedingten Rüstvorgänge beschränken. Abbildung 5.3 zeigt die einzelnen Schritte des Allokationsalgorithmus.

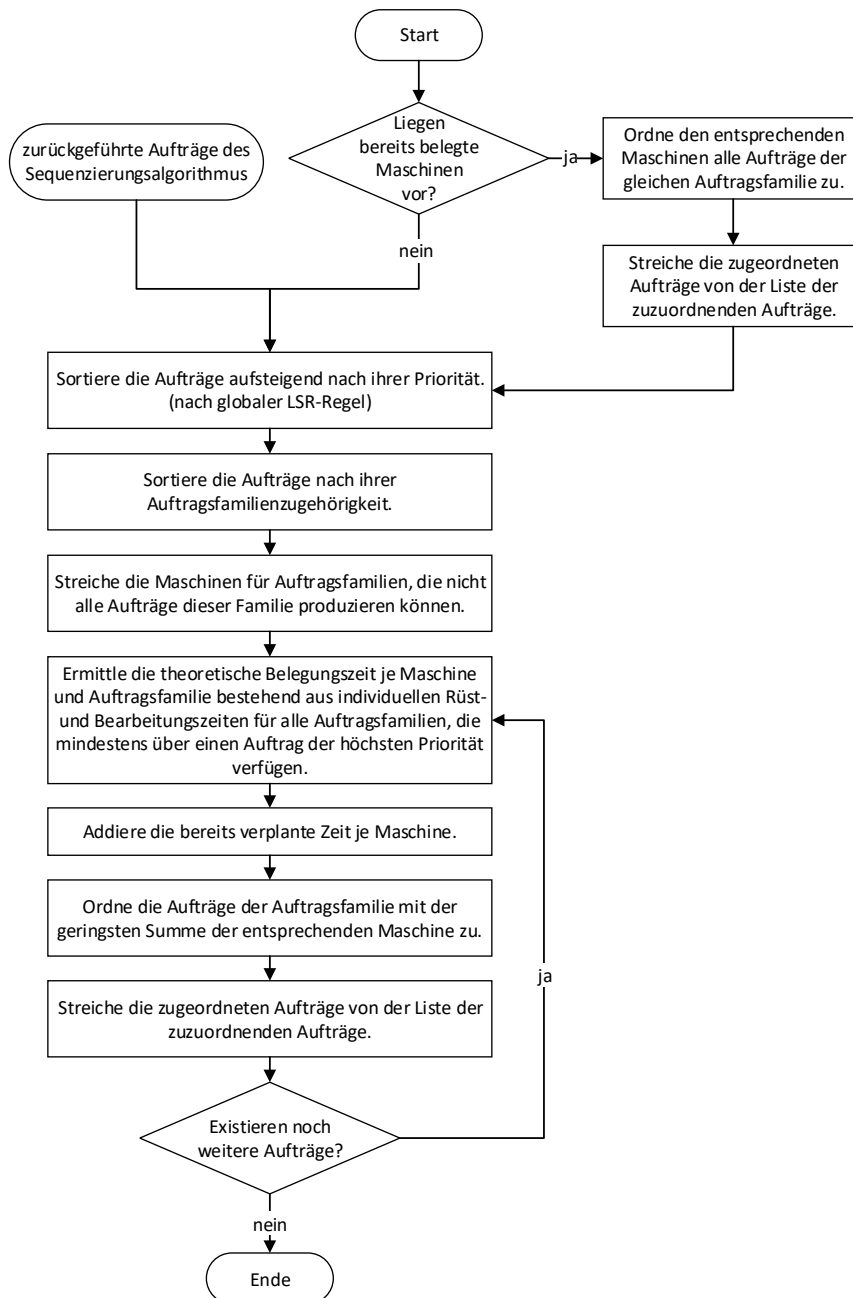


Abbildung 5.3: Algorithmus zur zentralen Auftragsverteilung, in Anlehnung an [Nahhas 2017, S. 58], angepasst und erweitert zur Nutzung für eine reaktive Planerstellung

Der Allokationsalgorithmus agiert produktionsstufen- und ereignisbasiert. Nach dem Start der simulationsbasierten Optimierung werden die bereits zum Zeitpunkt  $t_0$  vorliegenden und freigegebenen Aufträge ( $r_j = 0$ ) allokiert. Dazu wird die Belegung der zu beplanenden Maschinen überprüft. Während des reaktiven Planungsprozesses liegt im Normalfall bereits eine Maschinenbelegung vor, die aus dem alten Produktionsplan resultiert. Diese besteht aus Aufträgen, die entweder gerade produziert oder für die Maschine fixiert sind ( $I_i^{fix}; I_i^{prod}$ ). In diesem Fall werden alle Aufträge gleicher Familien aus dem Auftrags-Allokationspool der jeweiligen Maschine zugeordnet. Dieser Schritt entfällt bei einer prädikativen Planermittlung, da zu Beginn der Planung keine Maschinenbelegung existiert und alle Aufträge den Status  $I_i^{frei}$  besitzen. Nach diesem ersten Zuordnungsschritt werden alle sich noch im Vorrat befindenden Aufträge gemäß ihrer Priorität und Familienzugehörigkeit sortiert. In der Praxis können häufig nicht alle Produkte auf allen Maschinen gefertigt werden. Damit eine Splittung von Auftragsfamilien möglichst vermieden bzw. reduziert wird, werden nachfolgend alle Maschinen für Auftragsfamilien gestrichen, die nicht sämtliche Aufträge produzieren können. Diese Information ist im jeweiligen Arbeitsplan der Produkte hinterlegt und wird über die zentrale Datenbank bereitgestellt<sup>48</sup>. Für Auftragsfamilien, die (mindestens) über einen Auftrag der höchsten Priorität verfügen, wird die theoretische Maschinenbelegungszeit für jede (in Frage kommende) Maschine berechnet. Dabei sind die unterschiedlichen Bearbeitungs- und Rüstzeiten der homogenen Maschinen zu beachten. Als weiteres Kriterium wird die bereits vorhandene Belegungszeit der Maschinen additiv hinzugefügt. Die Auftragsfamilie, die die geringste Gesamtsumme auf einer Maschine hervorruft, wird entsprechend allokiert und anschließend aus dem zu allozierenden Auftragspool gestrichen. Das beschriebene Vorgehen wird solange wiederholt, bis alle Aufträge einer Maschine zugeordnet sind. Die vom Sequenzierungsalgorithmus zurückgeführten Aufträge durchlaufen erneut (so lange) den Allokationsprozess, bis keine weitere Rückführung stattfindet.

### 5.2.3 Der maschinenbasierte Sequenzierungsalgorithmus

Nachdem die zu produzierenden Aufträge durch den Allokationsalgorithmus einer Maschine zugeordnet wurden, startet der lokale, maschinenbasierte Sequenzierungsalgorithmus. Dieser besteht aus einer Familien- und einer Auftragsebene, wobei die Familienebene über der Auftragsebene angeordnet ist. Ziel des Konzeptes ist es, möglichst viele Aufträge einer Familie nacheinander zu produzieren, ohne dabei zugeordnete und höher priorisierte Aufträge anderer Familien zu verletzen. Nach der Auftragsallokation wird zunächst der Algorithmus der Familienebene gestartet, vgl. Abbildung 5.4. Zu Beginn wird geprüft, ob die zu beplanende Maschine bereits durch aktuell produzierte ( $I_i^{prod}$ ) oder fixierte Aufträge ( $I_i^{fix}$ ) belegt ist. Dieses Szenario liegt nahezu immer bei der reaktiven Planerstellung vor. In diesem Fall werden alle Aufträge, die der gleichen Familie angehören, wie die der bereits auf der Maschine vorliegenden, der Auftragsebene zugeordnet. Liegt zu Beginn keine Maschinenbelegung vor, wird aus dem vorhandenen Auftragsvorrat der Maschine diejenige Auftragsfamilie ermittelt, die zum einen über mindestens einen Auftrag der höchsten vorhandenen Priorität verfügt, und zum anderen die kleinste theoretische Bearbeitungszeit auf der Maschine aufweist. Alle Aufträge dieser Familie werden der Auftragsebene zugeführt und der entsprechende Algorithmus dieser Ebene wird gestartet. Kleine Auftragsfamilien werden somit bevorzugt bearbeitet, was einen Unterschied zum praxisnahen Agieren vieler Planer darstellt. Diese präferieren intuitiv oft die zeitintensivsten Auftragsfamilien, da es sich oft um die größeren Kunden handelt und zusätzlich im

<sup>48</sup> Die Manipulation des Produkt-Arbeitsplans durch den Planer ermöglicht eine indirekte Lenkung bzw. Steuerung der Maschinenbelegung. Verändert der Planer beispielsweise den Arbeitsplan eines Produktes dahingehend, dass er bis auf eine Maschine alle anderen streicht, gibt er dem Feinplanungssystem indirekt die Maschinenbelegung mindestens für das relevante Produkt vor.



Nahbereich Rüstzeit eingespart werden kann. Mittel- und langfristig weist dieses Vorgehen allerdings deutliche Schwächen bezüglich der Summe aller Auftragsverspätungen auf, die OTD (On Time Delivery) sinkt entsprechend.

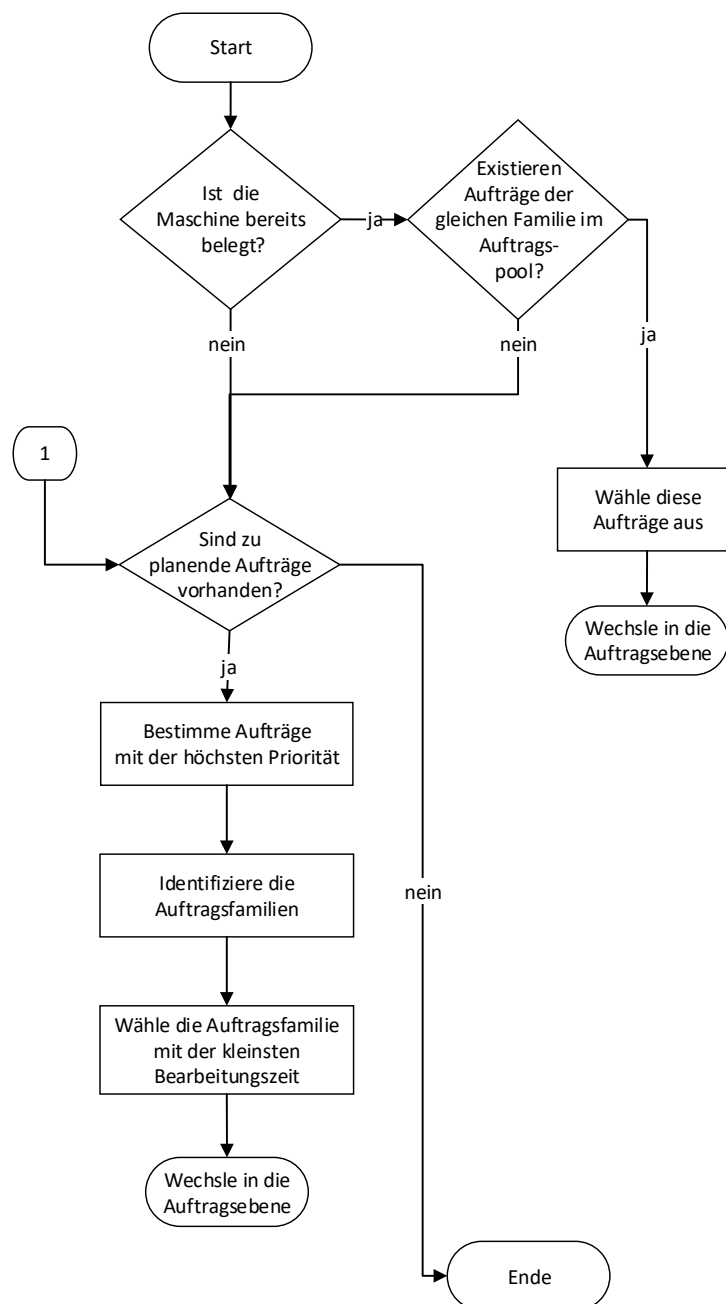


Abbildung 5.4: Algorithmus der Familienebene, modifiziert und erweitert nach [Nahhas 2015, S. 49]

Der auftragsbasierte Algorithmus legt als letztes Element der Feinplanung die Auftragsreihenfolge auf der entsprechenden Maschine fest. Dazu wird der Auftrag mit der höchsten Priorität der übergebenen Auftragsfamilie gewählt. Liegt generell die höchste Priorität bezüglich des Auftragspools der Familienebene dieser Maschine vor, erfolgt die sofortige Einplanung des Auftrags und damit Einordnung in die Reihenfolge des aktuellen Maschinenbelegungsplans. Liegen jedoch höher priorisierte Aufträge anderer Auftragsfamilien im Auftragspool der Familienebene dieser Maschine vor, erfolgt eine Abschätzung, inwieweit diese durch das theoretische Einplanen des vorliegenden

Auftrags nur noch verspätet produziert werden können. Dabei wird die voraussichtliche Durchlaufzeit der Aufträge anhand der durchschnittlichen Bearbeitungszeiten auf den Maschinen aller noch zu durchlaufenden Produktionsstufen ermittelt. Zusätzlich besteht die Annahme, dass auf jeder Produktionsstufe vorab eine auftragsfamilienbasierte Umrüstung stattfindet. Weitere Pufferzeiten gehen in die Berechnung nicht mit ein. Das Ergebnis wird mit dem gewünschten Endlieferdatum verglichen. Der Algorithmus der Auftragsebene ordnet prioritätsbasiert alle vorliegenden Aufträge der Familie, die keine aufgeführte Verletzung verursachen, dem Maschinenbelegungsplan zu. Führt eine theoretische Einplanung nun zu einer Verletzung eines höher priorisierten Auftrags der Familienebene, so wird dieser Auftrag übersprungen und der nachfolgende geprüft. Liegt kein weiterer ungeprüfter Auftrag in der Auftragsebene vor, werden alle nichteingepannten Aufträge zurück zum zentralen Allokationsalgorithmus deallokiert. Anschließend erfolgt der Wechsel in die Familienebene, um die nächste Auftragsfamilie zur Einplanung auszuwählen. Das beschriebene Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Aufträge einer Maschine zugeordnet sind, vgl. Abbildung 5.5.

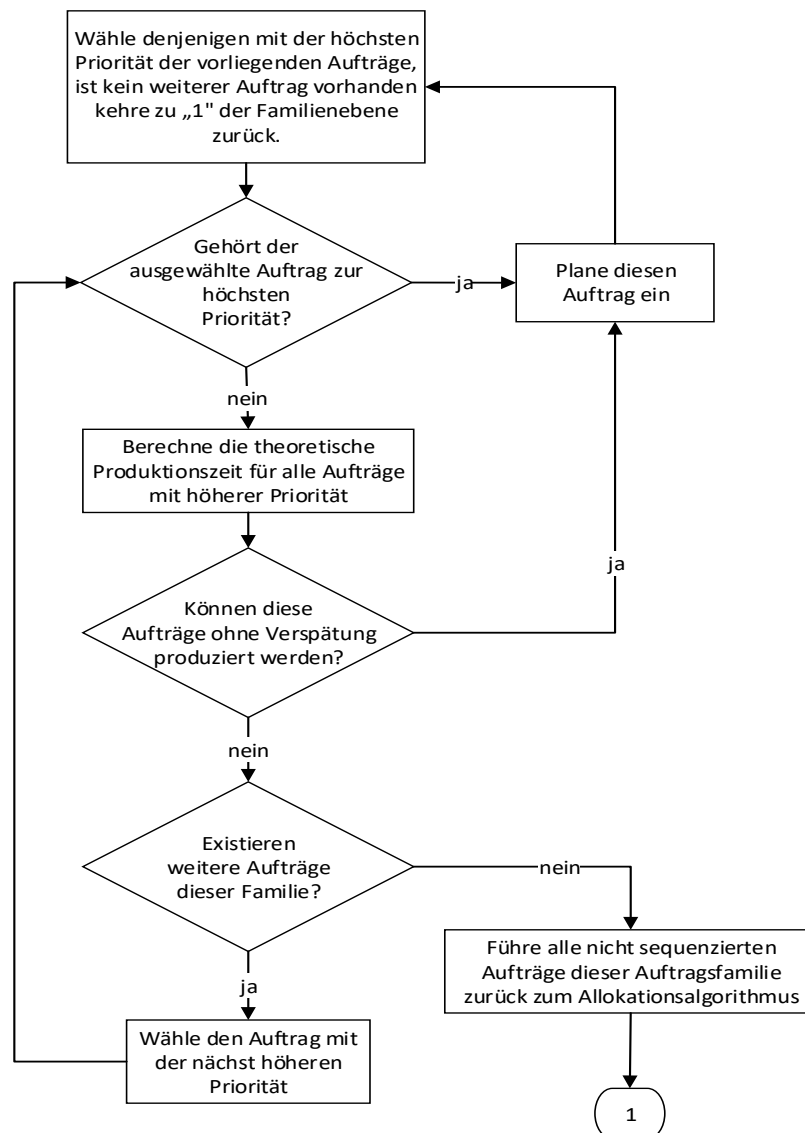


Abbildung 5.5: Algorithmus der Auftragsebene, modifiziert und erweitert nach [Nahhas 2015, S. 49]

### 5.3 Der hybride Simulationsansatz

Das zur Lösungsfindung eingesetzte Simulationsmodell hat einen entscheidenden Einfluss auf die Anforderungen einer schnellen Rechenzeit sowie einer hohen Modellgenauigkeit. Wie Abschnitt 3.3.3 zeigt, existieren verschiedene Simulationsarten, die prinzipiell zur Lösung der vorliegenden Problemstellung eingesetzt werden können. Aufgrund der differierenden Anforderungen bezüglich des Detaillierungsgrades der einzelnen Prozessschritte erscheint es sinnvoll, unterschiedliche Simulationsarten miteinander zu kombinieren. Ziel ist es, ein *hybrides Simulationsmodell* zu entwickeln, welches

- einen hohen Detaillierungsgrad relevanter Prozesse und (trotzdem)
- eine schnelle Simulation des Gesamtmodells

ermöglicht. Dieses besitzt damit einen mesoskopischen Charakter [Reggelin 2011, S.33 ff.; Reggelin et al. 2020], wodurch die Vorteile von ereignisdiskreter sowie ratenbasierter Simulation genutzt werden können. Abbildung 5.6 zeigt die Nutzung von ereignisdiskreter und ratenbasierter Simulation während der verschiedenen Prozessabschnitte in einer Produktionsstufe.

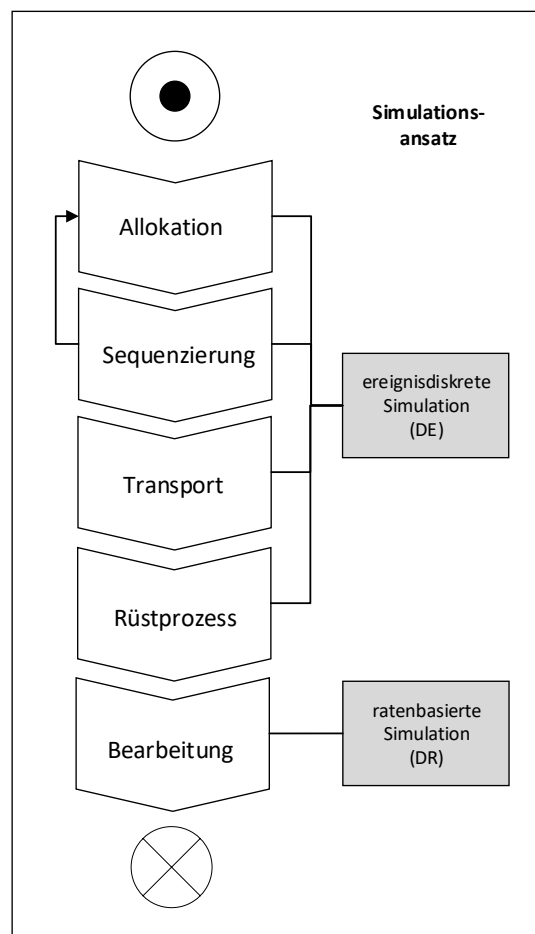


Abbildung 5.6: Prozessablauf während der Simulation einer Produktionsstufe

In der Praxis kommen viele unterschiedliche Ausprägungen einer HFS-Produktion zur Anwendung. Ein allgemein gültiger Einsatz des Verbesserungsverfahrens ist nur möglich, wenn sich das Modell auf die Anforderungen und Änderungen der realen Produktion zeitnah anpassen lässt. Dazu wurde das modulare Vorgehen gewählt (vgl. Abschnitt 5.2.1), wobei bei jeder Produktionsstufe die nachfolgend beschriebenen Prozesse durchlaufen werden. Die Produktionsaufträge unterliegen zu Beginn dem Prozess der Allokation, der eine entsprechende Zuordnung der Aufträge zu den Maschinen  $M_{i,s}$  einer Produktionsstufe  $s$  durchführt. Der anschließende Sequenzierungsprozess generiert mit Hilfe der zugeteilten Aufträge eine verbindliche Auftragsreihenfolge an den Maschinen  $M_{i,s}$ . Wie in Abschnitt 5.1 erläutert finden diese beiden Prozesse oft wiederholt statt, bis möglichst gute Zuordnungen bzw. Auftragsreihenfolgen erzeugt sind. Ist ein Auftrag anschließend fest durch den Algorithmus der Auftragsebene einer Maschine zugeordnet, erfolgt die Simulation des Transports. Bevor die Bearbeitung eines Produktionsauftrags gestartet werden kann, muss die Maschine dafür entsprechend eingerichtet bzw. gerüstet werden. Aufgrund der erläuterten Anforderungen werden diese vier Prozesse ereignisdiskret abgebildet. Abbildung 5.7 zeigt dabei das prinzipielle Vorgehen der Aggregation von Produkten des ereignisdiskret umgesetzten Bereichs der Simulation. Die einzelnen Flussobjekte (Leiterplatten) werden zu Leiterplatten-Nutzen zusammengefasst, welche wiederum zu Produktionsaufträgen aggregiert werden.

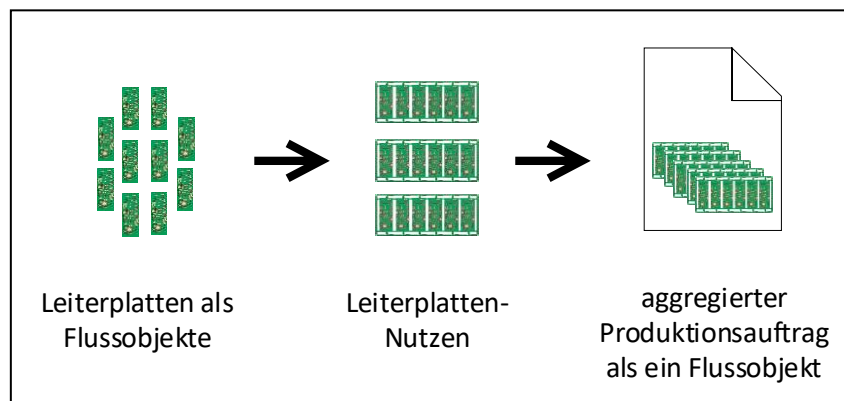


Abbildung 5.7: Aggregiertes Vorgehen während der Simulation bei ereignisdiskret abgebildeten Prozessen

Dieses Vorgehen ermöglicht eine schnellere Simulation, während die Modellgenauigkeit auf ein notwendiges Maß (Produktionsauftrag als ein Objekt) reduziert wird. Die Abbildung des Prozesses der Bearbeitung bzw. der Veredelung der Produkte muss die Anforderungen einer laufenden, sich häufig ändernden realen Produktion erfüllen. Dazu ist es notwendig, eine höhere Modellgenauigkeit zu erlangen, welche dennoch möglichst schnelle Ergebnisse erzielt. Die ratenbasierte Simulation (Discrete-Rate-Simulation; DR) erfüllt diese Anforderungen. Die einzelnen Leiterplatten-Nutzen als kleinste gemeinsame Einheit werden dafür als Rate betrachtet und durch den Bearbeitungsprozess geführt.

Zwei entscheidende Vorteile können daraus abgeleitet werden:

- exakte Abbildung des realen Bearbeitungsprozesses zu jedem Zeitpunkt
- Möglichkeit der Verplanung und zeitgleichen Bearbeitung eines Auftrags auf mehreren Produktionsstufen

Tritt während der Bearbeitung eines Auftrags eine Störung an einer Maschine auf, lässt sich dieser Zustand auch im Simulationsmodell exakt bis auf den einzelnen Leiterplatten-Nutzen nachstellen, vgl. Abbildung 5.8. Das entwickelte Feinplanungssystem hat damit ein bestmöglich synchronisiertes Simulationsmodell zur Lösung der Problemstellung zur Verfügung. Wie bereits in Abschnitt 2.8.1 erläutert, weisen aktuelle Feinplanungssysteme erhebliche Defizite hinsichtlich ihres Störungsmanagements auf. Oft liegt ein Grund darin, dass die Produktionsaufträge während der Bearbeitung als ein aggregiertes Objekt betrachtet werden. Eine genaue Abbildung der realen Produktion im Simulationsmodell ist somit nicht realisierbar. Des Weiteren ermöglicht die flussbasierte Betrachtung der Produktionsaufträge während der Bearbeitung, dass sich ein Auftrag auf mehreren Produktionsstufen befinden und zeitgleich bearbeitet werden kann. Dieses Vorgehen hat einen positiven Einfluss auf die Qualität der erzeugten Produktionspläne. Wartezeiten und auftragsbedingte Maschinenstillstände - und damit die Gesamtdurchlaufzeit der Produktionsaufträge reduzieren sich. Zudem entspricht dieses Vorgehen auch dem realen Produktionsprozess. Dazu werden im Simulationsmodell (Teil-)Losgrößen je Produktionsauftrag festgelegt, die nach erfolgreicher Produktion an einer Produktionsstufe zur Bearbeitung an den folgenden Produktionsstufen freigegeben sind.

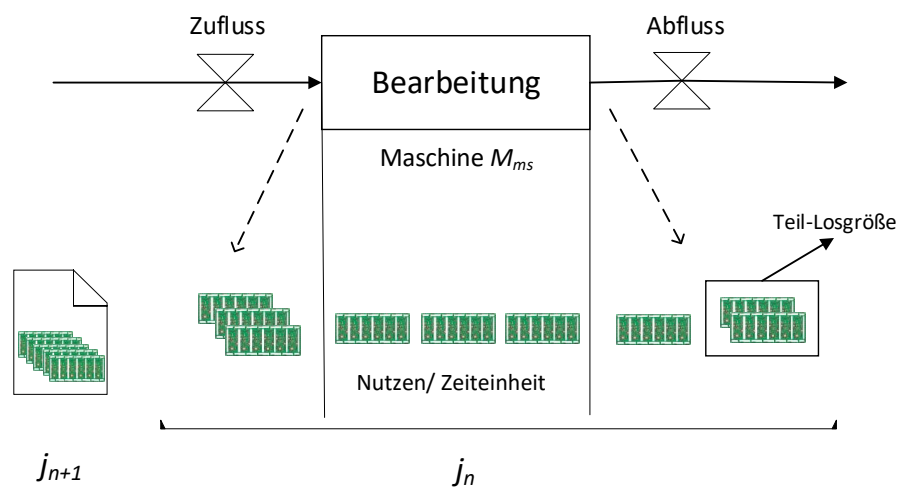


Abbildung 5.8: Ratenbasiertes Vorgehen während der Simulation des Bearbeitungsprozesses

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der hybride Simulationsansatz die betrachteten Prozesse der realen Produktion in Bezug auf den notwendigen Detaillierungsgrad bestmöglich im Simulationsmodell abbildet und dabei eine hohe, den Anforderungen entsprechende Modellgeschwindigkeit erzielt.

## 5.4 Zusammenfassung

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren der **Modular Integrierten Simulationsbasierten Optimierung** (MISO) stellt einen neuen Ansatz zur Lösung komplexer Planungsprobleme von HFS-basierten Produktionen dar und schließt somit die Lücke, die im Kontext der umfassend durchgeführten Literaturrecherche in Kapitel 3 aufgezeigt wird. Das Verfahren basiert auf einer Kombination von verschiedenen Simulationsarten und heuristischen Optimierungsalgorithmen mit dem Ziel, Lösungen in guter Qualität trotz kurzer, echtzeitfähiger Rechenzeit zu generieren. Es geht dabei konstruierend vor, wobei das Gesamtproblem in (stufenweise) Teilprobleme zerlegt wird. Anschließend erfolgt die Lösung der Teilprobleme sowie die Zusammensetzung der Gesamtlösung. Die Interaktion von Sequenzierungs- und Zuordnungsalgorithmen während der Simulation bildet die Grundlage des entwickelten Verfahrens. Der produktionsstufenbasierte Allokationsalgorithmus verteilt die einzuplanenden Aufträge gleichmäßig auf die parallelen Maschinen, um die Gesamtzykluszeit zu minimieren. Dabei werden Aufträge einer Produktfamilie möglichst zusammenhängend zugeteilt, um längere Rüstzeiten zu vermeiden. Die Ausführung des Allokationsalgorithmus erfolgt dabei ereignisbasiert. Die so (je Produktionsstufe) aufgeteilten Aufträge werden anschließend durch den maschinenbasierten Sequenzierungsalgorithmus in einer möglichst guten Produktionsreihenfolge angeordnet. Dieser lokale, reihenfolgebildende Algorithmus verfügt über eine Familien- und eine Auftragsebene, die während der simulationsgestützten Optimierung miteinander interagieren. Neben der Priorität des jeweiligen Auftrags werden auch die reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten berücksichtigt. Während der reaktiven Phase fließen zusätzliche Informationen wie u. a. die aktuelle Belegung der Maschine oder der Bearbeitungsstand des aktuell eingeplanten Auftrags mit in die zukünftige Belegungsplanung ein. Die Entwicklung eines hybriden Simulationsansatzes (ereignisdiskret und ratenbasiert) erlaubt dabei eine schnelle Simulation trotz hohen Detaillierungsgrades relevanter Prozesse. Während die Vorgänge der Allokation, der Sequenzierung, des Transports sowie des Rüstprozesses ereignisdiskret und somit schnell zu simulieren sind, erfolgt die Abbildung des Bearbeitungsprozesses ratenbasiert. Damit lässt sich zu jedem Zeitpunkt die reale Produktion exakt auf das Simulationsmodell übertragen. Nur so kann sichergestellt werden, dass die reaktiv durchgeführte Planung mit den richtigen Ausgangsparametern agiert. Außerdem besteht die Möglichkeit der Planung einer zeitgleichen Bearbeitung eines Auftrags auf mehreren Produktionsstufen, wie es in der realen Produktion oft gängige Praxis ist.

Nachdem das entwickelte MISO-Verfahren in diesem Kapitel vorgestellt und die Struktur und Arbeitsweise umfassend beschrieben wurden, widmet sich das folgende Kapitel 6 der Evaluierung des neuen, simulationsgestützten Verbesserungsverfahrens.

## 6 Evaluierung des MISO-Verfahrens

Das entwickelte und in Kapitel 5 vorgestellte Feinplanungsverfahren MISO soll anhand von realen Problemstellungen eines EMS-Dienstleisters in Hinblick auf seine Leistungsfähigkeit umfangreich untersucht werden. Inhalt dieses Kapitels ist es folgerichtig, die erzielten Ergebnisse zu präsentieren und einzuordnen. Dazu erfolgt in Abschnitt 6.1 zunächst die Vorstellung der Simulationsumgebung, in der das MISO-Verfahren sowie weitere Feinplanungsverfahren zum Vergleich realisiert wurden. Der sich anschließende Abschnitt 6.2 beschreibt die Randbedingungen bestehend aus den ausgewählten Szenarien, der vorhandene Datengrundlage sowie den eingesetzten Feinplanungsverfahren. Vorstellung und Analyse der Ergebnisse folgen in Abschnitt 6.3, bevor die in Abschnitt 6.4 aufgeführte Zusammenfassung der durchgeführten Planungsexperimente das Kapitel abschließt.

### 6.1 Simulationsumgebung

Zur Umsetzung des entwickelten Simulationsmodells wurde die Simulationssoftware ExtendSim 9.1 der Firma Imagine That Inc. gewählt. Die Software agiert mit Hilfe von verschiedenen Blöcken, eine individuelle und modular aufgebaute Struktur des Modells ist somit möglich. Neben der Möglichkeit der Animation von Modellen ist u. a.

- eine Sensitivitäts-Analyse,
- eine interaktive Reporting-Funktion,
- eine Kontroll-Panel-Schnittstelle sowie
- eine Entwicklungs- und Authoring-Umgebung

in die Software integriert. Abbildung 6.1 zeigt die Sicht der oberen Hierarchieebene am Beispiel des Szenario-Modells mit der bei dieser Untersuchung höchsten betrachteten Komplexität. Jeder Block besteht dabei aus vielen Unterfunktionen und -prozessen. Der Einsatz von „Data Import Export“ – Blöcken stellt den notwendigen Datenaustausch zu externen Programmen sicher. Durch die Verwendung geeigneter Bausteine aus der umfassenden Bibliothek von ExtendSim können sowohl ereignisdiskrete als auch ratenbasierte Prozesse abgebildet werden. Eine Kopplung von Material- und Informationsfluss gewährleisten Set-Bausteine, die den von der Quelle erzeugten Flussobjekten alle relevanten Parameter in Form von Attributen mitgeben.

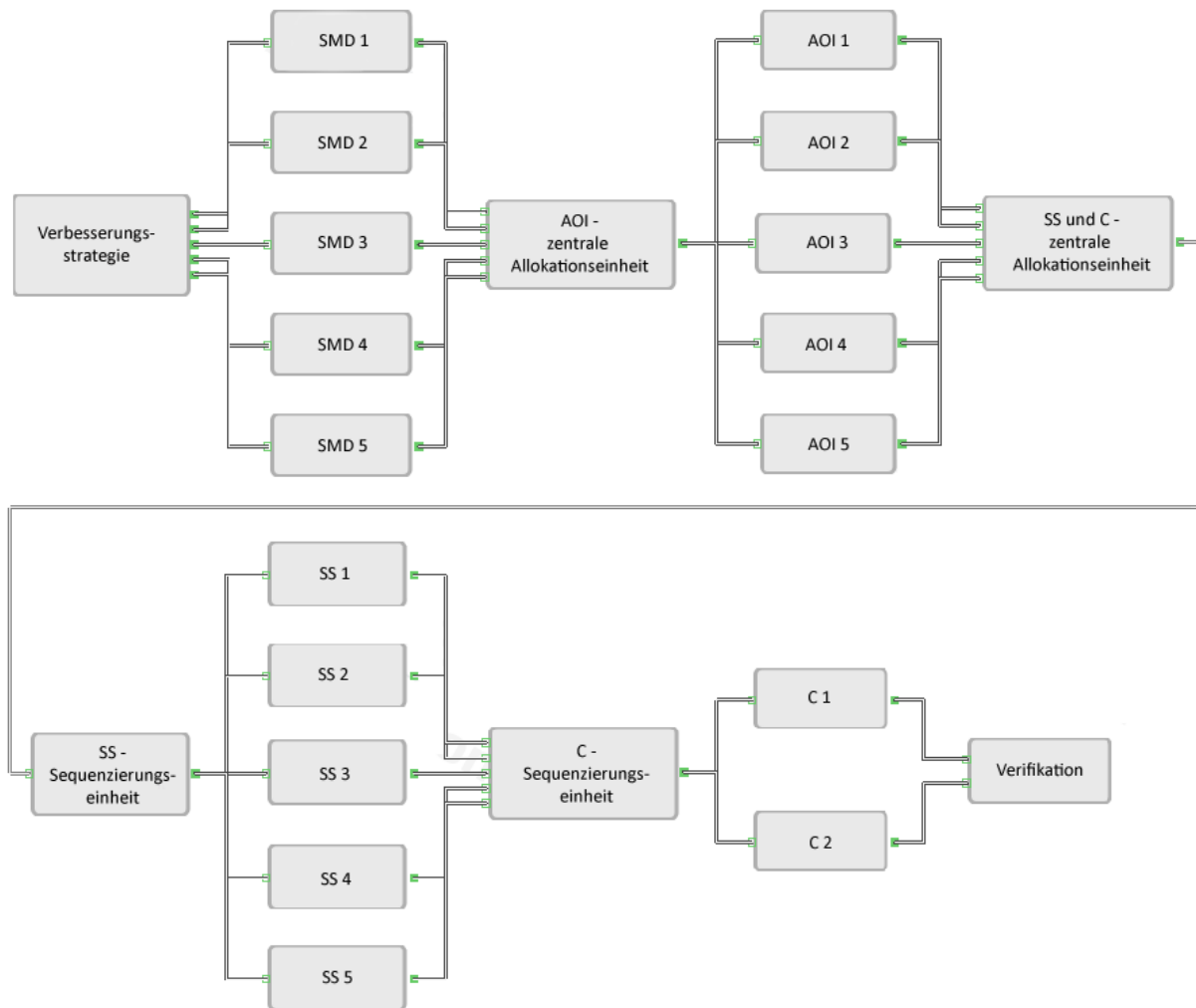


Abbildung 6.1: Obere Hierarchieebene des Max-Szenarios [ExtendSim 9.1]

Wie im Kapitel 5 beschrieben, besitzt das entwickelte MISO-Verfahren einen hybriden Charakter. Die Kopplung von ereignisdiskreten und ratenbasierten Strukturen zur Abbildung eines mesoskopischen Verhaltens steht im Fokus bei der Umsetzung des Konzepts und soll im Folgenden näher beschrieben werden. Zur Erstellung der obersten Ebene des Modells wird die DE-Modellierungsbibliothek genutzt. Die verwendeten Attribute der zu generierenden Auftrags-Objekte stellt das bestehende Datenmodell bereit. Neben dem Familientyp, der Auftragsmenge, der Nutzengröße sowie der Priorität des jeweiligen Auftrags werden auch alle produktionsspezifischen Daten übergeben. Auch für die Implementierung der Allokations- und Sequenzierungsprozesse kommen ereignisdiskrete Bausteine zum Einsatz. Die Modellierung der Aufträge erfolgt dabei aggregiert (ein Auftrag = ein Flussobjekt). Für den sich anschließenden Prozess der Bearbeitung wird hingegen die ratenbasierte Abbildung der Aufträge genutzt. Nachdem der aggregierte Auftrag den Sequenzierungsalgorithmus passiert hat, wird er durch die Vereinzelungseinheit in eine Produktionsrate umgewandelt und im Produktions- „Tank“ abgelegt. Das sich anschließende Verzögerungselement simuliert die Zeit der Bearbeitung und sendet die notwendigen Informationen an die Zusammenführungseinheit. Diese bildet anschließend wieder aggregierte, ereignisdiskrete Flussobjekte, die dem nachfolgenden Prozess bereitgestellt werden.



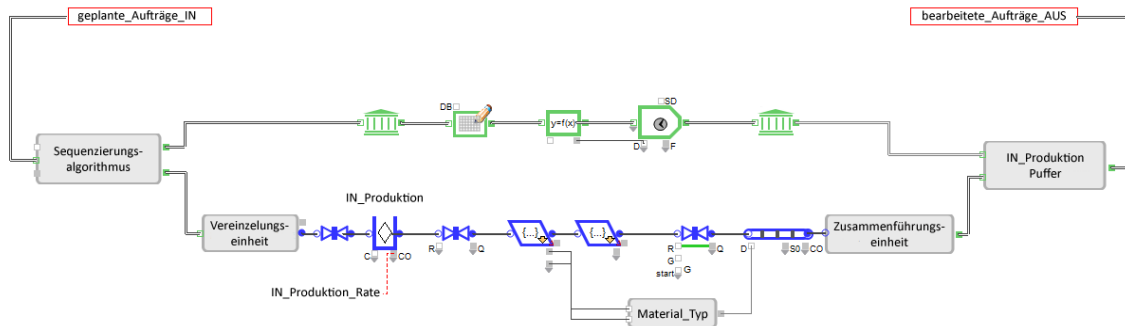


Abbildung 6.2: Hybride Modellierung am Beispiel einer Maschine der ersten (SMD-) Stufe

Häufig treten ungeplante Störungen während der Bearbeitung von Aufträgen auf. Ist in diesem Fall der Zustand der Realität gut auf das Modell übertragbar, liegt die gleiche Ausgangsbasis vor. Diese ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Plananalyse und ggf. Aktualisierung durch das Simulationsmodell. Das beschriebene hybride Vorgehen ermöglicht eine hohe Abbildegenauigkeit während der Bearbeitung von Aufträgen. Der reale Zustand der Produktion lässt sich zu jedem Zeitpunkt stückzahlgenau darstellen bzw. ermitteln. Damit erfüllt die Struktur des entwickelten MISO-Verfahrens die Anforderungen als digitaler Zwilling des abgebildeten Produktionssystems. Die ermittelten Ergebnisse stehen zeitnah und genau dort zur Verfügung, wo die aufgetretene Störung Gegenmaßnahmen erfordert.

## 6.2 Randbedingungen der experimentellen Untersuchung

### 6.2.1 Auswahl der Szenarien

Die Erprobung des MISO-Verfahrens wird anhand von fünf Szenarien durchgeführt (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Szenarien-Auswahl zur Erprobung des MISO-Verfahrens

	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3		Szenario 4		Szenario 5	
	Stufe	Maschinen	Stufe	Maschinen	Stufe	Maschinen	Stufe	Maschinen	Stufe	Maschinen
Anzahl Stufen/ Maschinen	1	5	1	4	1	3	1	2	1	1
	2	5	2	5	2	4	2	3	2	3
	3	5	3	2	3	3	3	1	3	3
	4	2	4	1	4	3				
Anzahl Datensätze	30		30		30		30		30	
Anzahl Feinplanungsverfahren	4		4		4		4		4	
Anzahl Lösungen	120		120		120		120		120	

Die ersten drei Stufen SMD-Fertigung, AOI Prüfung sowie Selektives Löten bestehen jeweils aus heterogenen Maschinen  $R$  mit teilweise unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Die vierte

Stufe beinhaltet bei Szenario eins und drei identische Maschinen  $P$  (der Beschichtung). Auf den Stufen eins (SMD-Fertigung) und vier (Beschichtung) existieren zusätzlich produktionsfamilienabhängige Rüstzeiten  $s_{g,h}$ . Im ersten Szenario wird ein vierstufiges HFS-Problem mit mehreren Maschinen auf den unterschiedlichen Produktionsstufen untersucht. Die Szenarien zwei und drei bestehen ebenfalls aus einem vierstufigen HFS-Problem, wobei die Anzahl der jeweiligen Maschinen auf den unterschiedlichen Produktionsstufen variiert.

Tabelle 6.2: Experimentell untersuchte HFS-Problemstellungen

Szenario	HFS-Problem
1	$HFS4(R5, R5, R5, P2) \mid s_{g,h} \mid C_{max}, \bar{T}, U, MS_1$
2	$HFS4(R4, R5, R2, 1) \mid s_{g,h} \mid C_{max}, \bar{T}, U, MS_1$
3	$HFS4(R3, R4, R3, P3) \mid s_{g,h} \mid C_{max}, \bar{T}, U, MS_1$
4	$HFS3(R2, R3, 1) \mid s_{g,h} \mid C_{max}, \bar{T}, U, MS_1$
5	$HFS3(R1, R3, R3) \mid s_{g,h} \mid C_{max}, \bar{T}, U, MS_1$

Mit Hilfe der Szenarien vier und fünf werden jeweils unterschiedliche dreistufige HFS-Probleme untersucht. Hintergrund ist der Umstand, dass viele mittelständische EMS-Dienstleister aufgrund der hohen Investitionssumme nur über wenige (oft nur eine) SMD-Linie(n) verfügen. Somit stellt die Kapazität der ersten (SMD) Stufe das Bottleneck des gesamten Produktionssystems dar. Ziel dieser Unternehmen ist es, die wertintensiven Maschinen möglichst gut auszulasten und Stillstand-Zeiten etwa durch aufwendige Hauptrüstvorgänge oder Störungen zu vermeiden. Bei Szenario drei und vier entfällt zudem die vierte Stufe der Beschichtung. Tabelle 6.2 fasst die zu untersuchenden Problemstellungen zusammen. Es soll der Produktionsplan gefunden werden, der die Zykluszeit, die durchschnittliche Verspätung von Aufträgen, die Anzahl von verspäteten Aufträgen sowie die Anzahl produktionsfamilienbedingter Umrüstungen minimiert (vgl. Abschnitt 5.1). Abbildung 6.3 zeigt den in Szenario eins verwendeten Hybrid-Flow-Shop.

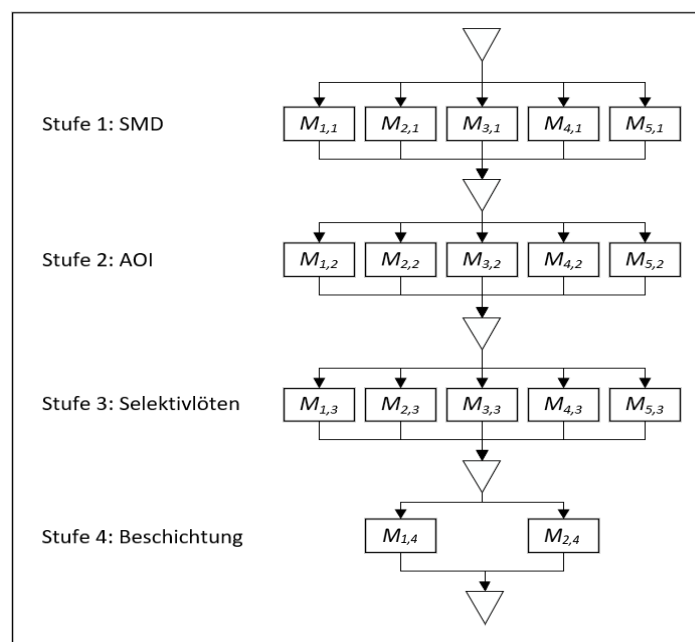


Abbildung 6.3: Vierstufige HFS-Produktion eines EMS-Dienstleisters

## 6.2.2 Datengrundlage der Experimente

Bei der Auswahl und Durchführung der Experimente steht neben der Forderung einer möglichst realitätsnahen Problemstellung die Verwendung von realen Produktionsdaten im Vordergrund. Die notwendigen Daten werden von einem mittelständischen Unternehmen der Elektronikfertigung bereitgestellt. Charakteristisch dabei ist die hohe Anzahl unterschiedlicher Kunden, die sich über viele Branchen erstreckt. Das Unternehmen beliefert sowohl Auftraggeber der Automobilindustrie, der Sicherheitstechnik sowie der Industrie-, Telekommunikations- und Medizintechnik.

Zur Durchführung der Experimente werden pro Szenario 30 unterschiedliche Datensätze untersucht. Diese stammen aus den eingesetzten Systemen des Unternehmens (u. a. ERP-System [SAP], SIPLACE pro, COMPASS) und bilden somit ein reales Produktionsprogramm ab. Jeder Datensatz enthält dabei einen festgelegten Auftragsbestand. Die in Tabelle 6.3 aufgeführten Parameter gelten dabei für alle Szenarien.

Tabelle 6.3: Identische Daten der untersuchten Szenarien

	Parameter	Beschreibung	Produktionsstufen			
			SMD	AOI	SS	C
Szenarien 1 - 5	<b>Auftragsdaten</b>					
	Priorität	Wichtigkeit gemäß Kundenwunschliefertermin	1-20			
	<b>Maschinendaten</b>					
	Rüstzeit MAX	maximale Rüstzeit in min	65	15	20	120
	Rüstzeit MIN	minimale Rüstzeit in min	20	15	20	15
	<b>zeitliche Parameter</b>					
	Schichtmodell	wöchentlich zur Verfügung stehende zeitliche Kapazität	Dreischichtmodell Montag - Freitag; Samstag und Sonntag frei			
	Wochenkapazität	Schichten je Woche	15			
	Schichtkapazität	Arbeitszeit je Schicht in min	435			

Jeder Datensatz enthält 160 verschiedene Aufträge, wobei manche nicht von allen Produktionsstufen bearbeitet werden müssen. Der Planungszeitraum beträgt bei jedem Simulationslauf ca. vier Wochen und umfasst alle zur Produktion freigegebenen Aufträge. Die Priorität ergibt sich aus dem Kundenwunschliefertermin und ist maßgeblich für die Einordnung der Aufträge auf den Maschinen verantwortlich. Jedes Produkt wird im betrachteten Zeitraum nur einmal produziert (Auftrags-ID = Produkt-ID). Prinzipiell können aber auch mehrere Aufträge eines Produktes im gleichen Zeitraum betrachtet werden. Auf der ersten Produktionsstufe (SMD) existieren 35-40 Produktfamilien. Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Lacke ergeben sich drei neue Produktfamilien auf der vierten Stufe (Beschichtung). Die hohe Bandbreite verschiedenartiger Kunden lässt sich auch anhand der Nutzengröße abschätzen, die zwischen einer und 140 Leiterplatten je Nutzen liegt. Die jeweiligen Auftrags-Bearbeitungszeiten ergeben sich aus diversen Parametern und unterscheiden sich stark voneinander. Kennzeichnend für das betrachtete Produktionssystem sind Rüstzeiten, die bei einem Produktwechsel entstehen.

Tabelle 6.4: Individuelle Daten-Charakteristik der untersuchten Szenarien

			Produktionsstufen				
Daten	Parameter	Beschreibung	SMD	AOI	SS	C	
Szenario 1	Auftragsdaten	Auftrags-ID	Anzahl unterschiedlicher Aufträge	160	160	119 - 134	90 - 120
		Stückzahl	Anzahl Leiterplatten je Auftrag in Stück	5 - 99.000			
	Produkt- daten	Produkt-ID	Anzahl unterschiedlicher Produkte	160	160	119 - 134	90 - 120
		Familientyp	Anzahl Produktfamilien	35-40	-	-	3
		Nutzengröße	in Stück (Min-Max)	1 - 140			
	Maschinen- daten	Maschinen-ID	Anzahl Maschinen je Produktionsstufe	5	5	5	2
Bearbeitungszeit		je Auftrag in min	35 - 1.262	30 - 1.315	33 - 900	30 - 916	
Szenario 2	Auftragsdaten	Auftrags-ID	Anzahl unterschiedlicher Aufträge	160	160	80-107	36-64
		Stückzahl	Anzahl Leiterplatten je Auftrag in Stück	4 - 244.800			
	Produkt- daten	Produkt-ID	Anzahl unterschiedlicher Produkte	160	160	80-107	36-64
		Familientyp	Anzahl Produktfamilien	37-40	-	-	3
		Nutzengröße	in Stück (Min-Max)	1 - 140			
	Maschinen- daten	Maschinen-ID	Anzahl Maschinen je Produktionsstufe	4	5	2	1
Bearbeitungszeit		je Auftrag in min	15 - 1.197	15 - 1.100	13 - 1093	15 - 1087	
Szenario 3	Auftragsdaten	Auftrags-ID	Anzahl unterschiedlicher Aufträge	160	160	79 - 109	91 - 118
		Stückzahl	Anzahl Leiterplatten je Auftrag in Stück	4 - 144.000			
	Produkt- daten	Produkt-ID	Anzahl unterschiedlicher Produkte	160	160	79 - 109	91 - 118
		Familientyp	Anzahl Produktfamilien	40	-	-	3
		Nutzengröße	in Stück (Min-Max)	1 - 140			
	Maschinen- daten	Maschinen-ID	Anzahl Maschinen je Produktionsstufe	3	4	3	3
Bearbeitungszeit		je Auftrag in min	12 - 1.199	15 - 1.100	13 - 999	15 - 1.099	
Szenario 4	Auftragsdaten	Auftrags-ID	Anzahl unterschiedlicher Aufträge	160	160	49 - 71	-
		Stückzahl	Anzahl Leiterplatten je Auftrag in Stück	2 - 110.320			
	Produkt- daten	Produkt-ID	Anzahl unterschiedlicher Produkte	160	160	49 - 71	-
		Familientyp	Anzahl Produktfamilien	40	-	-	-
		Nutzengröße	in Stück (Min-Max)	1 - 140			
	Maschinen- daten	Maschinen-ID	Anzahl Maschinen je Produktionsstufe	2	3	1	-
Bearbeitungszeit		je Auftrag in min	50 - 1.187	15 - 1.099	12 - 999	-	
Szenario 5	Auftragsdaten	Auftrags-ID	Anzahl unterschiedlicher Aufträge	160	160	80 - 105	-
		Stückzahl	Anzahl Leiterplatten je Auftrag in Stück	3 - 151.200			
	Produkt- daten	Produkt-ID	Anzahl unterschiedlicher Produkte	160	160	49 - 71	-
		Familientyp	Anzahl Produktfamilien	40	-	-	-
		Nutzengröße	in Stück (Min-Max)	1 - 140			
	Maschinen- daten	Maschinen-ID	Anzahl Maschinen je Produktionsstufe	1	3	3	-
Bearbeitungszeit		je Auftrag in min	50 - 1.241	15 - 1.100	13 - 1.000	-	

Betrachtet werden generell zwei verschiedene Arten. Eine Minor-Rüstung (MIN) muss durchgeführt werden, wenn ein Produktwechsel innerhalb einer Produktfamilie an einer Maschine der Stufen eins und vier durchgeführt wird. Ändert sich hingegen auch die Produktfamilie zweier

aufeinanderfolgenden Aufträge an einer Maschine, wird die Zeit einer Major-Rüstung (MAX) benötigt. Bei den Stufen zwei und drei entspricht die Minor- der Major-Rüstzeit. Angenommen wird außerdem ein Dreischichtmodell von Montag-Freitag, welches eine wöchentliche Kapazität von 15 Schichten ermöglicht. Die aktuellen Pausenzeiten sind mit 45 min je Schicht berücksichtigt und werden entsprechend von der verfügbaren Kapazität abgezogen. Tabelle 6.4 beschreibt die unterschiedlichen Parameter. Für jedes der betrachteten Szenarien liegt ein kombinatorisches Problem der Klasse  $NP$  vor (vgl. Abschnitt 2.2). Vereinfacht man beispielsweise das erste Szenario auf vier Stufen mit jeweils nur einer Maschine (ohne weitere Restriktionen), so entstünden bei den betrachteten 160 Aufträgen nicht weniger als

$$(N!)^M = (160!)^4 = (4,7147e + 284)^4 \quad (6.1)$$

mögliche Lösungsvarianten. Eine zunehmende Anzahl von Maschinen auf den vorliegenden Produktionsstufen lässt die Problemgröße zusätzlich enorm ansteigen.

### 6.2.3 Untersuchte Feinplanungsverfahren

Zusätzlich zum im vorherigen Kapitel dargelegten neu entwickelten MISO-Verfahren sollen weitere Feinplanungsverfahren zum Vergleich und zur Beurteilung der Simulationsexperimente betrachtet werden. Zur Untersuchung kommen dafür, neben der momentan im Unternehmen angewendeten Feinplanung, prioritätsregelbasierte Verfahren, die Ergebnisse in der benötigten Zeit erzeugen können, vgl. Abschnitt 3.3.2.

Die Regel der kürzesten Verarbeitungszeit SPT (Shortest-Processing-Time) ist in Unternehmen mit komplexen Produktionsstrukturen weit verbreitet, um eine Zuweisung von Ressourcen zu Aufträgen vorzunehmen. Dabei wird der Auftrag mit der kürzesten Bearbeitungszeit an der jeweiligen Maschine priorisiert und als nächstes produziert. Hoss erforscht bereits 1965 viele Prioritätsregeln und kommt zum Ergebnis, dass die SPT-Regel bezüglich der Minimierung der Durchlaufzeit sowie der Maximierung der Kapazitätsauslastung vergleichsweise sehr gute Ergebnisse liefert [Hoss 1965, S.168]. Auch Hunsucker und Shah führten 1994 eine umfassende Analyse verschiedener Prioritätsregeln hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in einer Flow-Shop-Umgebung durch [Hunsucker & Shah 1994, S. 111]. Sie konnten belegen, dass die SPT-Regel vielen anderen Regeln überlegen ist, wenn es u. a. um die Zielerreichung einer Minimierung der Zykluszeit geht. Die aufgezeigten positiven Eigenschaften hinsichtlich der kapazitätsorientierten Ziele sind schlussendlich ausschlaggebend für die Verwendung dieser Regel in der vorliegenden Arbeit.

Eine möglichst hohe Liefertermintreue soll erreicht werden, wenn die Regel der frühesten Fälligkeit EDD (Earliest-Due-Date) zum Einsatz kommt. Demnach werden Aufträge gemäß ihrer Lieferfähigkeit priorisiert, um die Kunden zeitgerecht zu beliefern. Im Hinblick auf die Effizienz des Produktionssystems sind jedoch Nachteile zu erwarten, da relevante Parameter wie beispielsweise auftragsfamilienbedingte Rüstzeiten nicht betrachtet werden. Teichner weist mittels umfangreicher Simulationsexperimente nach, dass die EDD-Regel die besten Ergebnisse hinsichtlich der Zielgrößen der gesamten Terminüberschreitung sowie der gesamten Terminabweichung liefert [Teichner 2010, S. 196 f.]. Die EDD Regel soll im Folgenden zum Einsatz kommen, um einen terminorientierten Vergleich der Leistungsfähigkeit der Verfahren zu gewährleisten.

Ferner ist die aktuell im betrachteten Unternehmen verwendete Form der Feinplanung zum Vergleich heranzuziehen. Dabei liegt das Ziel in der absoluten Vermeidung nicht notwendiger produktfamilienbedingter Rüstvorgänge. Eine Maximierung der verfügbaren Kapazität (besonders auf

der ersten Stufe) soll dadurch erreicht werden. Folglich darf eine Maschine, die einen Auftrag aus einer Familie produziert, erst dann umgestellt werden, wenn alle Aufträge dieser Familie vollständig auf dieser Maschine produziert sind. Die Strategie der Familienproduktion (FP) zielt auf eine Minimierung der Zykluszeit ab, akzeptiert dabei aber hohe Lieferterminabweichungen.

Zusammenfassend soll das MISO-Verfahren, die SPT-Regel, die EDD-Regel sowie die Vorgehensweise der Familienproduktion (FP) bei den simulationsbasierten Experimenten untersucht werden. Zur Schaffung einer neutralen und vergleichbaren Ausgangsbasis wird bei allen Verfahren zunächst die Erstallokation aller Aufträge zu den Maschinen der ersten Stufe gemäß dem entwickelten Allokations-Algorithmus des MISO-Verfahrens durchgeführt. Anschließend kommt das jeweilige Verfahren zur Anwendung. Dabei wird ein statisches Problem betrachtet, d. h. alle zur Simulation notwendigen Informationen liegen zu Beginn vor. Jedes Verfahren erzeugt genau eine Lösung je Datensatz und Szenario. Somit werden insgesamt 600 Lösungen erzeugt (4 Verfahren, 5 Szenarien, 30 Datensätze/Szenario). Auf die Darstellung und Analyse der erzielten Simulationsergebnisse geht der folgende Abschnitt 6.3 ein.

### 6.3 Analyse der durchgeführten Experimente


In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Experimente dargestellt und analysiert. Zu Beginn sollen dabei die unterschiedlichen Zielkriterien separat betrachtet werden. Im Anschluss erfolgt die (gewichtete) Zusammenführung, um einen gesamtheitlichen Vergleich abzubilden.

Das erste Szenario soll im Folgenden als Max-Szenario bezeichnet werden. Mit jeweils fünf heterogenen Maschinen auf den ersten 3 Stufen sowie 2 parallelen Maschinen auf der vierten Stufe weist es die höchste Problem-Komplexität auf, die in dieser Arbeit betrachtet wird. Die erzielten Ergebnisse sollen anhand des Max-Szenarios ausführlich beschrieben werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Szenarien zwei bis fünf analysiert, um festzustellen, ob die Ergebnisse des Max-Szenarios verallgemeinert werden können. Die Darstellung erfolgt dabei konsolidiert, die ausführlichen Daten sind im Anhang aufgeführt. Neben der nachfolgend beschriebenen Qualität der generierten Ergebnisse stand die benötigte Simulationszeit im Fokus der Arbeit. Durchschnittlich benötigt ein Simulationslauf eines Datensatzes unter Verwendung der Verfahren EDD, SPT und FP ca. 0,7 – 1,3 Sekunden. Das MISO-Verfahren benötigt hierfür ca. 1,1 – 1,9 Sekunden. Somit kann festgestellt werden, dass alle verwendeten Verfahren die Bedingung einer echtzeitbasierten Lösungsfindung einhalten und unterstützen.

#### 6.3.1 Zykluszeit $C_{max}$

Die Ergebnisse der Experimente des Max-Szenarios bezüglich  $C_{max}$  fasst Tabelle 6.5 zusammen. Die Zykluszeiten der untersuchten 30 Datensätze liegen zwischen 20.460 min und 12.941 min, was bei gegebenem Schichtplan etwa einer Auftragslast von 10 - 16 Arbeitstagen entspricht. Somit existiert im betrachteten Zeitraum von vier Wochen noch freie Kapazität, weitere (zukünftig) freigegebene Aufträge zu produzieren. Das MISO-Verfahren erzeugt bei 17 Datensätzen die geringste Zykluszeit, gefolgt vom Verfahren der Familienproduktion (FP) mit insgesamt 13 Datensätzen. Die Verfahren SPT und EDD führen bei keinem Datensatz zur besten Lösung.

Tabelle 6.5: Ermittelte Zykluszeiten  $C_{max}$  (in min) der Datensätze des Max-Szenarios


Datensatz	Verfahren				
	MISO	EDD	SPT	FP	
1	17.807	19.685	20.365	18.940	
2	14.380	16.339	16.579	14.960	
3	16.735	18.766	19.358	18.008	
4	18.432	19.890	19.997	18.913	
5	16.785	18.694	18.274	17.427	
6	18.904	20.182	19.992	18.325	
7	16.620	17.602	18.042	16.850	
8	17.575	18.124	18.049	16.067	
9	16.425	16.703	16.713	15.530	
10	14.708	16.876	16.816	14.820	
11	18.279	19.546	19.222	17.617	
12	16.116	17.596	18.149	16.896	
13	12.941	15.438	15.798	15.065	
14	16.026	17.899	16.691	16.235	
15	15.480	16.224	15.856	15.284	
16	15.478	16.699	17.080	15.169	
17	16.359	18.817	19.062	16.529	
18	16.584	17.994	17.076	15.977	
19	17.132	19.371	20.070	17.535	
20	16.821	18.147	17.618	16.459	
21	17.472	19.500	20.108	18.600	
22	16.579	17.698	17.305	15.748	
23	17.367	18.450	19.256	17.172	
24	15.479	17.536	17.067	15.034	
25	15.911	17.104	17.164	16.433	
26	17.305	18.210	18.624	17.241	
27	18.568	19.031	19.525	17.628	
28	17.550	20.314	20.460	19.452	
29	17.232	19.545	19.785	17.831	
30	17.319	19.378	19.820	18.291	

Das MISO-Verfahren weist im Vergleich mit durchschnittlich 16.679 min/ Datensatz die geringste und damit beste Zykluszeit auf, gefolgt vom Verfahren der Familienproduktion mit 16.868 min/ Datensatz. Mit einer durchschnittlich 1.566 min/ Datensatz höheren Zykluszeit im Vergleich zum MISO Verfahren (was ca. 3,6 Schichten entspricht) liegen die Werte des EDD-Verfahrens auf Platz drei gefolgt vom SPT-Verfahren mit einer, im Vergleich zum MISO-Verfahren, durchschnittlich 1.652 min/ Datensatz höheren Zykluszeit (ca. 3,8 Schichten). Zusammengefasst benötigt das MISO-Verfahren durchschnittlich ca. 12,8 Arbeitstage zur Vollendung des letzten Auftrags, gefolgt vom FP-Verfahren mit durchschnittlich ca. 12,9 Arbeitstagen. Mit im Mittel ca. 14 notwendigen Arbeitstagen je Datensatz liegen die Ergebnisse der Verfahren SPT und EDD ca. 9% höher.

### 6.3.2 Anzahl verspäteter Aufträge $U$

Als kundenorientierte Zielgröße gibt die Anzahl der verspäteten Aufträge  $U$  Aufschluss über den Einhaltungsgang der Kundenwunschtermine. Tabelle 6.6 enthält die Ergebnisse des Max-Szenarios.

Tabelle 6.6: Anzahl verspäteter Aufträge  $U$  der Datensätze des Max-Szenarios

Datensatz	Verfahren				
	MISO	EDD	SPT	FP	
1	4	1	21	40	
2	5	1	16	28	
3	3	0	25	40	
4	4	0	31	48	
5	6	1	20	34	
6	5	3	22	42	
7	3	0	20	27	
8	4	0	24	31	
9	2	0	15	31	
10	2	0	17	27	
11	4	1	26	36	
12	4	0	11	35	
13	2	0	10	25	
14	2	0	19	28	
15	0	0	15	25	
16	4	0	15	23	
17	4	0	13	25	
18	2	0	17	31	
19	3	0	19	36	
20	5	0	17	35	
21	2	0	24	36	
22	5	1	16	22	
23	2	0	18	31	
24	2	0	16	25	
25	6	1	18	36	
26	2	0	25	35	
27	3	0	18	31	
28	5	0	17	34	
29	3	1	19	29	
30	1	0	16	31	

Das EDD-Verfahren erzeugt bei 22 Datensätzen des Max-Szenarios keine verspäteten Aufträge, auch der Durchschnittswert liegt mit nur 0,3 deutlich an erster Stelle. Das Ergebnis erfüllt die Erwartung und ist zugleich ein Beleg für die richtige Arbeitsweise des Simulationsmodells. Mit durchschnittlich 3,3 verspäteten Aufträgen je Datensatz, welche bei den jeweils 160 betrachteten Aufträgen ca. 2% ausmachen, belegt das MISO-Verfahren den zweiten Rang. Mit großem Abstand folgt das SPT-Verfahren, welches auf durchschnittlich 18,7 verspätete Aufträge je Datensatz kommt, was einer Rate von ca. 12% entspricht. Das Verfahren der Familienproduktion erzeugt erwartungsgemäß die schlechtesten Ergebnisse des Vergleichs. Durchschnittlich 31,9 und damit ca. 20% aller Aufträge je





























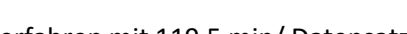
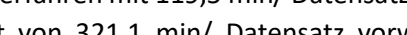



Datensatz des Max-Szenarios können nicht termingerecht eingeplant werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, verfolgt dieses Verfahren ausschließlich kapazitätsorientierte Ziele, was die Ergebnisse schlüssig belegen.

### 6.3.3 Mittlere Auftragsverspätung $\bar{T}$

Zusätzlich zur Anzahl verspäteter Aufträge soll das (mittlere) Ausmaß der Verspätungen mit in die Bewertung eingehen. Dafür werden die absoluten Zeitüberschreitungen verspäteter Aufträge ausgewertet und gemittelt (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Mittlere Verspätung  $\bar{T}$  (in min) relevanter Aufträge des Max-Szenarios

Datensatz	Verfahren				
	MISO	EDD	SPT	FP	
1	255	121	4.582	4.386	
2	426	790	4.099	3.683	
3	471	0	3.853	3.479	
4	163	0	3.727	4.237	
5	391	49	2.598	4.457	
6	309	201	4.754	4.409	
7	157	0	3.521	4.191	
8	484	0	2.987	4.753	
9	177	0	3.536	3.423	
10	103	0	2.357	2.993	
11	475	1.499	3.838	4.442	
12	498	0	4.530	3.705	
13	443	0	1.502	3.739	
14	408	0	3.275	3.711	
15	0	0	3.593	3.968	
16	146	0	2.859	3.165	
17	472	0	4.674	3.216	
18	417	0	3.345	3.533	
19	472	0	3.216	4.581	
20	100	0	2.898	3.451	
21	127	0	3.430	3.944	
22	361	407	3.493	3.997	
23	120	0	3.320	4.985	
24	428	0	3.121	4.237	
25	370	404	3.546	3.107	
26	539	0	3.093	5.120	
27	471	0	3.051	5.359	
28	286	0	3.566	4.447	
29	368	115	2.827	4.883	
30	197	0	2.975	4.443	

Durchschnittlich liegt die mittlere Verspätung beim EDD-Verfahren mit 119,5 min/ Datensatz auf Rang eins, gefolgt vom MISO-Verfahren, welches einen Wert von 321,1 min/ Datensatz vorweist. Die

mittlere Verzögerung verspäteter Aufträge liegt damit bei ca. 2 (EDD) bzw. 5,35 Stunden (MISO). Deutlich höhere Werte erzielen die Verfahren SPT und FP, die auf durchschnittlich 3.405 min (ca. 2,6 Arbeitstage) bzw. 4.068 min (ca. 3,1 Arbeitstage) kommen. Dieses Ergebnis entspricht auch den Beobachtungen des betrachteten Unternehmens. Das Defizit des vorrangig eingesetzten FP-Verfahrens hinsichtlich massiv erzeugter Terminabweichungen führt zu großen Herausforderungen. Fasst man die ermittelten Ergebnisse der Zielgrößen  $\bar{T}$  und  $U$  für das FP-Verfahren des Max-Szenarios zusammen, so werden bei den 160 untersuchten Aufträgen jeweils durchschnittlich 20% mit einer Verspätung von 3,1 Arbeitstagen eingeplant. Auch ohne die Betrachtung potenzieller Störungen und Verzögerungen während der Produktion widerspricht dieses Ergebnis dem Ziel einer hohen OTD zum Kunden in großem Maß.

### 6.3.4 Anzahl Hauptrüstungen der ersten (SMD-) Stufe $MS_1$

Die Produktionsstufe der SMD-Fertigung ist gekennzeichnet durch kostenintensive Maschinen und komplexe Produktionsprozesse. Bei einer Umrüstung auf eine neue Produktfamilie entsteht ein hoher Aufwand, da die gesamte Linie mit den unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen neu eingefahren werden muss. Ziel sollte es demnach sein, die Hauptrüstvorgänge auf der SMD-Produktionsstufe auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Somit kann die Effektivität gesteigert und das Risiko (von möglichen Fehlern bei der Neuausrichtung) reduziert werden. Tabelle 6.8 fasst die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente des Max-Szenarios zusammen.

Tabelle 6.8: Anzahl Hauptrüstvorgänge  $MS_1$  an Produktionsstufe eins des Max-Szenarios

Datensatz	Verfahren				<span style="color: black;">■</span> MISO <span style="color: red;">■</span> EDD <span style="color: blue;">■</span> SPT <span style="color: gray;">■</span> FP
	MISO	EDD	SPT	FP	
1	49	132	141	35	
2	41	134	137	32	
3	48	127	141	35	
4	47	130	133	35	
5	44	121	131	34	
6	47	127	136	33	
7	43	129	139	33	
8	43	135	134	35	
9	48	134	139	35	
10	40	132	137	34	
11	47	134	136	35	
12	40	129	136	32	
13	38	133	136	34	
14	43	128	137	35	
15	40	134	134	35	
16	43	139	137	33	
17	41	135	137	35	
18	47	128	144	33	
19	43	132	137	35	
20	44	135	144	35	
21	45	126	144	33	
22	42	138	141	34	
23	44	127	133	35	
24	43	138	134	35	
25	47	142	137	34	
26	44	125	136	35	
27	44	137	138	35	
28	45	140	138	35	
29	41	131	133	34	
30	36	130	134	34	

Das SPT-Verfahren plant durchschnittlich 137,1 Hauptrüstvorgänge zur Lösung der vorliegenden Problemstellung ein. Damit erfolgt bei ca. 86% aller Aufträge vorab ein Hauptrüstprozess, welcher sich massiv auf die verfügbare SMD-Kapazität (minus 4.630,5 min oder 10,6 Schichten im Vergleich zum FP-Verfahren) auswirkt. Gemäß der Logik des Verfahrens werden die unterschiedlichen, produktfamilienabhängigen Rüstparameter nicht berücksichtigt.

### 6.3.5 Ergebnisse der Szenarien zwei bis fünf

Im folgenden Abschnitt werden die experimentell erzeugten Resultate der Szenarien zwei bis fünf analysiert und mit dem Max-Szenario verglichen. Tabelle 6. 9 fasst die Ergebnisse zusammen, wobei das jeweils beste und schlechteste Ergebnis je Szenario und Verfahren farblich markiert ist. Die darin aufgeführten Werte entsprechen den Mittelwerten der Datensätze je Szenario. Insgesamt wurden dafür 150 verschiedene Experimente durchgeführt.

Tabelle 6. 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien eins – fünf

		Szenario				
		1	2	3	4	5
$MS_1$	Verfahren					
	MISO	43,6	49,1	49,4	54,7	81,8
	EDD	132,1	133,7	137,9	142,1	143,9
	SPT	137,1	140,4	145,1	148,9	150,1
$\bar{T}$ in min	Verfahren					
	MISO	321	384	411	158	30
	EDD	120	54	65	33	146
	SPT	3.406	4.257	3.950	3.771	6.020
$U$	Verfahren					
	MISO	3,3	2,8	2,8	1,8	0,3
	EDD	0,3	0,2	0,2	0,1	1,8
	SPT	18,7	25,0	25,0	26,7	52,2
$C_{max}$ in min	Verfahren					
	MISO	16.679	19.534	18.901	18.704	22.464
	EDD	18.245	20.522	20.449	20.843	25.340
	SPT	18.331	20.521	20.561	21.184	25.838
$\bar{F}$ in min	Verfahren					
	MISO	7.557	8.967	8.780	8.802	11.066
	EDD	7.867	9.655	9.638	9.864	12.522
	SPT	5.409	6.348	6.258	6.733	10.581
FP	Verfahren					
	MISO	34,2	35,4	36,3	37,2	38,5
	EDD	4.068	4.937	4.786	4.980	5.787
	SPT	31,9	41,7	41,7	40,9	47,9
FP	Verfahren					
	MISO	16.868	19.290	18.887	18.726	20.679
	EDD	7.967	9.567	9.449	9.306	10.320
	SPT	5.409	6.348	6.258	6.733	10.581

Während das Verfahren der Familienproduktion die im Mittel geringste Zykluszeit  $C_{max}$  bei den Szenarien zwei, drei und fünf erzeugt, dominiert das MISO-Verfahren die Szenarien eins und vier. Die Verfahren EDD und SPT erreichen auch bei den Szenarien zwei bis fünf wesentlich höhere Werte im Vergleich zu FP- und MISO-Verfahren. Das im Szenario fünf betrachtete HFS-Problem mit nur einer SMD-Maschine wird vom Verfahren der Familienproduktion dominiert, die mit durchschnittlich 20.678 min ca. 8% bessere Ergebnisse erzielt als das MISO-Verfahren. Es folgen das EDD-Verfahren mit ca.

13% sowie das SPT-Verfahren mit ca. 15% höheren Zeiten als das FP-Verfahren. Der Trend des Max-Szenarios bezüglich der *Anzahl verspäteter Aufträge*  $U$  wird von den ermittelten Ergebnissen der Szenarien zwei bis vier grundsätzlich bestätigt. Die Werte des fünften Szenarios deuten auf eine Besonderheit hin, welche nachfolgend erläutert werden soll. Das Ergebnis der Produktionsplanermittlung ist in hohem Maß abhängig von der Maschinenzuordnung und anschließenden Auftragsreihenfolgebildung an der jeweiligen Maschine. Für das fünfte Szenario mit nur einer SMD-Maschine wird der Allokations-Algorithmus des MISO-Verfahrens auf der ersten Stufe nicht benötigt und inaktiv gesetzt. Somit erzielt das MISO-Verfahren ausschließlich mit dem eingesetzten Sequenzierungsalgorithmus bessere Ergebnisse als das EDD-Verfahren. Während das EDD-Verfahren diejenigen Aufträge priorisiert, die den frühesten Liefertermin vorweisen, betrachtet das MISO-Verfahren zusätzlich die Möglichkeit der Bildung von auftragsfamilienbedingten Reihenfolgen zur Vermeidung von Major-Rüstungen. Durch dieses Vorgehen wird eine effiziente Reihenfolgebildung an Stufe eins gewährleistet, ohne größere Lieferterminverletzungen zu generieren. Auch die erzeugten Werte der mittleren Verspätung  $\bar{T}$  der Szenarien eins bis vier weisen, verglichen mit dem Max-Szenario, ein ähnliches Verhalten und Ranking auf. Das Szenario fünf wird hingegen (erneut) dominiert vom MISO-Verfahren. Mit nur durchschnittlich 30 min/ je verspätetem Auftrag (bei insgesamt nur 8 absolut verspäteten Aufträgen aller Datensätze des fünften Szenarios) wird das EDD-Verfahren mit deutlich höheren Werten auf Platz zwei verwiesen. Dieses Ergebnis erscheint beachtlich, da zur Minimierung lieferterminbezogener Größen oftmals das EDD-Verfahren genannt und favorisiert wird. Hinsichtlich der *Anzahl Hauptrüstvorgänge*  $MS_1$  an Produktionsstufe eins erzeugt das FP-Verfahren durchgehend die besten Lösungen, es folgen die Verfahren MISO (Platz zwei), EDD (Platz drei) sowie SPT (Platz vier). Auch bei dieser Zielgröße weichen die erzielten Lösungen des MISO-Verfahrens bei Szenario fünf vom Trend ab. Erklärbar ist dies durch die fehlende Möglichkeit, potenziell zu spät eingeplante Aufträge auf eine andere Maschine der gleichen Stufe zu verlagern. Diese fehlende Re-Allokation bedingt einen erhöhten Rüstaufwand beim MISO-Verfahren, welches im Gegensatz zum FP-Verfahren versucht, Lieferterminverzögerungen zu vermeiden. Mit durchschnittlich 81,8 geplanten Hauptrüstungen bei Szenario fünf liegt das MISO-Verfahren somit weiterhin auf Platz zwei. Der Abstand zum FP-Verfahren ist dabei signifikant größer als bei den Ergebnissen der Szenarien eins bis vier. Der Vergleich der Ergebnisse soll zusätzlich durch die Betrachtung der jeweils erreichten *mittleren Flowtime*  $\bar{F}$  erweitert werden, die nicht mit in die Zielfunktion eingeht, jedoch wichtige Informationen bezüglich der Leistungsfähigkeit der untersuchten Verfahren bereitstellt. Die Flowtime oder Durchlaufzeit wird definiert als  $F_j = C_j - r_j$  und gibt die Verweildauer eines Auftrags  $j$  in der Produktion an. Gemäß dem Gesetz von Little gilt [Little 1961] gilt:

$$ZDL_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (6.2)$$

mit

$ZDL_m = \bar{F}$	mittlere Durchlaufzeit (Flowtime)
$B_m$	mittlerer Bestand
$L_m$	mittlere Leistung

Demnach bewirkt eine Reduzierung der mittleren Durchlaufzeit bei gleichbleibendem mittlerem Bestand eine Erhöhung der mittleren Leistung des betrachteten Produktionssystems. Die kapazitätsbezogenen Verfahren SPT und FP erzielen entlang der untersuchten Szenarien erwartungsgemäß die besten Ergebnisse, wobei das SPT-Verfahren deutlich die Szenarien eins bis vier dominiert. Mit durchschnittlich nur 10.320 min erzeugt das Verfahren der Familienproduktion die beste Lösung des Szenarios fünf hinsichtlich der mittleren Flowtime. Sinnvoll erscheint ein Vergleich

der Verfahren MISO und EDD. Mit einer (über alle betrachteten Szenarien) durchschnittlich 8,5% kleineren mittleren Flowtime ist das MISO- dem EDD-Verfahren deutlich überlegen. Dies entspricht immerhin ca. 875 min, also etwa zwei Arbeits-Schichten im Mittel.

### 6.3.6 Gewichtete Zielwertermittlung

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Ergebnisse relevanter Zielgrößen sollen zum Zweck einer gesamtheitlichen Betrachtung zusammengeführt werden. Dazu wird zunächst eine Normierung der unterschiedlichen Zielwerte gemäß

$$r_i = \frac{c_i - c_i^{min}}{c_i^{max} - c_i^{min}} \quad (6.3)$$

mit

$c_i$	zu normierender Zielwert
$c_i^{min}$	maximaler Wert
$c_i^{max}$	minimaler Wert
$r_i$	normierte Zielgröße ( $0 \leq r_i \leq 1$ )

durchgeführt. Anhand von unterschiedlichen Gewichtungen  $\omega$  erfolgt die Zielfunktionswertbestimmung der erprobten Verfahren (vgl. Abschnitt 5.1), indem die normierten Zielwerte mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor multipliziert werden. Zur Gewichtung der Zielkriterien kommen die folgenden Ansätze zur Anwendung:

gleichverteilte Gewichtung mit	$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 0,25$
kapazitätsorientierte Gewichtung mit	$\omega_1 = 0,4 ; \omega_2 = 0,1 ; \omega_3 = 0,1 ; \omega_4 = 0,4$
liefertreueorientierte Gewichtung mit	$\omega_1 = 0,1 ; \omega_2 = 0,4 ; \omega_3 = 0,4, \omega_4 = 0,1$
streng liefertreueorientierte Gewichtung mit	$\omega_1 = 0,05 ; \omega_2 = 0,45 ; \omega_3 = 0,45, \omega_4 = 0,05$
mit $\omega \geq 0: \forall (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1)$	

Tabelle 6.10 beinhaltet die ermittelten Zielfunktionswerte der untersuchten Datensätze des Max-Szenarios. Im Mittel dominiert das entwickelte MISO-Verfahren die vier gewählten gewichteten Zielfunktionen. Bei allen 30 untersuchten Datensätzen der gleichverteilten Gewichtung erzielt das MISO-Verfahren die besten Ergebnisse, gefolgt vom EDD-Verfahren. Vier der 30 untersuchten Datensätze werden bei der kapazitätsorientierten Gewichtung vom FP-Verfahren dominiert, 26 Datensätze hingegen vom MISO-Verfahren. Auch bei der Einstellung der liefertreueorientierten Gewichtung werden bei allen Datensätzen des Max-Szenarios die besten Ergebnisse durch das MISO-Verfahren generiert. Damit ein besserer Vergleich des MISO- mit dem EDD-Verfahren möglich ist, wird die streng liefertreueorientierte Gewichtung eingeführt. Dabei werden die liefertreuebezogenen Zielgrößen  $\bar{T}$  und  $U$  mit einem Gesamtfaktor von 0,9 gewichtet. Bei insgesamt 12 von 30 Datensätzen erzeugt das EDD-Verfahren die besten Ergebnisse. Beachtlich ist, dass selbst bei dieser einseitigen

Gewichtung des MISO-Verfahrens im Mittel die besten Ergebnisse erzielt und auch absolut 18 von 30 Datensätzen dominiert.

Tabelle 6.10: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung des Max-Szenario

$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,06	0,41	0,88	0,60	0,06	0,66	0,95	0,37	0,06	0,16	0,81	0,83	0,05	0,08	0,78	0,90
2	0,06	0,49	0,89	0,54	0,05	0,75	0,96	0,29	0,07	0,23	0,82	0,78	0,07	0,14	0,80	0,86
3	0,08	0,41	0,91	0,60	0,07	0,66	0,96	0,38	0,09	0,16	0,85	0,81	0,09	0,08	0,83	0,88
4	0,06	0,48	0,88	0,58	0,06	0,76	0,95	0,32	0,06	0,19	0,81	0,83	0,06	0,10	0,79	0,92
5	0,08	0,47	0,73	0,58	0,06	0,76	0,83	0,33	0,10	0,19	0,64	0,83	0,11	0,09	0,61	0,92
6	0,13	0,48	0,85	0,48	0,19	0,77	0,91	0,19	0,07	0,19	0,78	0,77	0,06	0,10	0,76	0,87
7	0,06	0,40	0,90	0,54	0,05	0,64	0,96	0,26	0,07	0,16	0,83	0,82	0,07	0,08	0,81	0,91
8	0,26	0,50	0,84	0,50	0,35	0,80	0,92	0,20	0,17	0,20	0,76	0,80	0,14	0,10	0,73	0,90
9	0,25	0,49	0,87	0,49	0,36	0,78	0,95	0,20	0,13	0,19	0,79	0,79	0,10	0,10	0,77	0,89
10	0,04	0,49	0,85	0,51	0,03	0,78	0,93	0,22	0,05	0,20	0,76	0,81	0,05	0,10	0,74	0,90
11	0,14	0,56	0,85	0,50	0,19	0,82	0,89	0,20	0,08	0,30	0,81	0,80	0,06	0,22	0,79	0,90
12	0,08	0,42	0,83	0,55	0,05	0,66	0,93	0,34	0,10	0,17	0,73	0,77	0,10	0,08	0,69	0,84
13	0,06	0,46	0,70	0,69	0,04	0,74	0,88	0,50	0,08	0,18	0,52	0,87	0,09	0,09	0,46	0,94
14	0,06	0,48	0,73	0,53	0,05	0,76	0,70	0,24	0,08	0,19	0,76	0,81	0,09	0,10	0,77	0,91
15	0,06	0,50	0,78	0,50	0,10	0,80	0,79	0,20	0,03	0,20	0,76	0,80	0,01	0,10	0,76	0,90
16	0,12	0,45	0,88	0,50	0,12	0,72	0,95	0,20	0,11	0,18	0,82	0,80	0,11	0,09	0,80	0,90
17	0,08	0,47	0,88	0,44	0,05	0,76	0,95	0,19	0,11	0,19	0,81	0,68	0,12	0,09	0,78	0,76
18	0,15	0,46	0,76	0,50	0,19	0,74	0,77	0,20	0,12	0,19	0,75	0,80	0,10	0,09	0,75	0,90
19	0,07	0,43	0,81	0,53	0,05	0,69	0,92	0,25	0,08	0,17	0,69	0,81	0,09	0,09	0,65	0,91
20	0,12	0,48	0,75	0,50	0,14	0,77	0,81	0,20	0,10	0,19	0,70	0,80	0,09	0,10	0,68	0,90
21	0,05	0,40	0,88	0,61	0,05	0,64	0,95	0,37	0,05	0,16	0,81	0,84	0,04	0,08	0,79	0,92
22	0,17	0,50	0,84	0,50	0,22	0,79	0,88	0,20	0,13	0,20	0,81	0,80	0,11	0,10	0,80	0,90
23	0,07	0,39	0,81	0,50	0,08	0,62	0,92	0,20	0,05	0,16	0,70	0,80	0,05	0,08	0,66	0,90
24	0,11	0,50	0,79	0,50	0,12	0,80	0,85	0,20	0,10	0,20	0,73	0,80	0,09	0,10	0,71	0,90
25	0,07	0,49	0,86	0,57	0,06	0,78	0,93	0,35	0,07	0,20	0,79	0,79	0,07	0,10	0,77	0,86
26	0,07	0,40	0,83	0,50	0,07	0,64	0,93	0,20	0,08	0,16	0,73	0,80	0,08	0,08	0,69	0,90
27	0,19	0,43	0,79	0,50	0,25	0,69	0,91	0,20	0,13	0,17	0,66	0,80	0,11	0,09	0,62	0,90
28	0,08	0,49	0,82	0,66	0,06	0,78	0,92	0,46	0,09	0,19	0,72	0,87	0,10	0,10	0,68	0,93
29	0,05	0,47	0,80	0,56	0,04	0,75	0,92	0,29	0,06	0,19	0,68	0,82	0,06	0,09	0,65	0,91
30	0,02	0,45	0,80	0,60	0,02	0,71	0,92	0,36	0,03	0,18	0,67	0,84	0,04	0,09	0,63	0,92
$\emptyset$	0,10	0,42	0,84	0,53	0,12	0,66	0,91	0,26	0,08	0,17	0,77	0,81	0,08	0,17	0,77	0,81

## 6.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Erprobung des entwickelten MISO-Verfahrens sind anhand von fünf unterschiedlichen Szenarien insgesamt 150 Simulationsläufe mit realen Produktionsdaten durchgeführt worden. Jeder Datensatz umfasst dabei einen Auftragsbestand von ca. vier Wochen. Die erzielten Ergebnisse der unterschiedlichen Zielgrößen wurden zur Zielwertermittlung anhand von vier unterschiedlichen Gewichtungen bestimmt. In Tabelle 6.11 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Demnach erzielt das MISO-Verfahren im Mittel bei den Szenarien eins bis vier die besten Ergebnisse aller durchgeführten Gewichtungen. Dabei unterscheiden sich die Zielfunktionswerte des EDD- und MISO-Verfahrens während der Anwendung der streng lieferterminorientierten Gewichtung 4 nur marginal bei den Szenarien zwei und drei. Das Szenario 5 (gekennzeichnet durch nur eine Maschine auf Produktionsstufe eins) weicht auch gesamtheitlich betrachtet vom Trend ab. Das FP-Verfahren generiert bei der kapazitätsorientierten Gewichtung 2 die besten Ergebnisse, das MISO-Verfahren folgt auf Rang zwei. Alle anderen betrachteten Gewichtungen werden durch das MISO-Verfahren dominiert.

Tabelle 6.11: Gewichtete Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente

		Mittelwert aus Datensätze/ Szenario				
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Gewichtung 1 <i>gleichverteilt</i>	MISO	0,10	0,13	0,10	0,10	0,18
	EDD	0,42	0,43	0,45	0,42	0,47
	SPT	0,84	0,81	0,83	0,84	0,99
	FP	0,53	0,53	0,53	0,53	0,46
Gewichtung 2 <i>kapazitätsorientiert</i>	MISO	0,12	0,16	0,11	0,12	0,29
	EDD	0,66	0,69	0,72	0,66	0,74
	SPT	0,91	0,87	0,91	0,91	0,99
	FP	0,26	0,26	0,25	0,26	0,18
Gewichtung 3 <i>liefertreueorientiert</i>	MISO	0,08	0,09	0,09	0,08	0,07
	EDD	0,17	0,17	0,18	0,17	0,20
	SPT	0,77	0,76	0,74	0,77	0,98
	FP	0,81	0,81	0,81	0,81	0,74
Gewichtung 4 <i>streng liefertreueorientiert</i>	MISO	0,08	0,08	0,07	0,08	0,04
	EDD	0,17	0,09	0,09	0,17	0,11
	SPT	0,77	0,74	0,78	0,77	0,98
	FP	0,81	0,90	0,90	0,81	0,83

## 7 Diskussion der Ergebnisse

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion entwickelt. Bezugnehmend auf die im Abschnitt 1.3 gestellten Forschungsfragen soll es Inhalt dieses Kapitels sein, die erzielten Ergebnisse zu diskutieren bzw. kritisch zu hinterfragen.

Im Anschluss an die systematische Literaturanalyse zu produktionswirtschaftlichen Grundlagen (Kapitel 2) und zu den bisher bekannten Verfahren und Lösungsstrategien zum Hybrid-Flow-Shop (Kapitel 3) befasst sich Kapitel 4 zunächst mit der Beantwortung der Forschungsfrage 1.

**F1:** Wie muss ein neues, ganzheitliches Konzept zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion beschrieben werden, welches auf Grundlage von realen Produktions-, Stamm- und kalkulierten Daten sowie eintretenden Störeinflüssen agiert?

Viele Unternehmen unterliegen einer (zum Teil steilen) klassischen, vertikalen Unternehmenshierarchie. Neben Vorteilen wie

- klaren Verantwortlichkeiten,
- festen Arbeitsaufteilungen oder
- nachvollziehbaren Strukturen

entstehen besonders in Bezug auf eine schnelle Kommunikation und Informationsweitergabe große Herausforderungen. Treten etwa Störungen im Ablauf der Organisation oder in der Produktion auf, müssen die Entscheidungsträger der oberen Hierarchien verfügbar sein, um das Problem zu lösen. Außerdem kann die Weitergabe von Anweisungen über die verschiedenen Ebenen bis zur ausführenden Position fehlerbehaftet sein, Informationsverluste können entstehen. Eine schnelle Reaktion auf kurzfristig auftretende Veränderungen wird erschwert und ist oft nicht rechtzeitig möglich. Grundsätzlich ist die Flexibilität einer klassisch geprägten Hierarchie gerade hinsichtlich der operativen Feinplanung stark eingeschränkt.

Das in Kapitel 4 umfassend beschriebene ganzheitliche Konzept zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion nutzt die Vernetzung und Verbindung der Akteure über alle Ebenen in horizontaler, als auch in vertikaler Richtung, um den beschriebenen Nachteilen der klassischen Hierarchie entgegenzutreten. Dabei werden neben den statischen Stammdaten auch reale, dynamische Produktionsdaten aufgenommen, um den aktuellen Stand der Fertigung zu jedem Zeitpunkt exakt zu erfassen bzw. analysieren zu können. Alle Akteure sind direkt über ein Netzwerk miteinander verbunden, die klassische Hierarchie-Pyramide wird abgelöst. Der Planer als alleiniger Entscheider tritt in den Hintergrund und hat zukünftig (nur noch) einen indirekten Einfluss auf die Entscheidungen des Feinplanungssystems. Grundsätzliche Anpassungen werden durch eine darauf spezialisierte IT-Abteilung übernommen und haben das Ziel, jederzeit die reale Produktion im Simulationsmodell möglichst exakt abzubilden. Notwendige Informationen werden in einer zentralen Datenbank verwaltet, wobei die abgelegten Daten durch geeignete Zugriffsrechte geschützt sind. Das gesamte System ist darauf ausgelegt, zu jedem Zeitpunkt möglichst alle zur Planung oder Planaktualisierung



notwendigen Daten dem automatischen Planungssystem im richtigen Datenformat bereitzustellen und nach der Planung alle (betroffenen) Akteure in Echtzeit mit den neuen Planungsdaten zu versorgen. Die initiale Feinplanung der Produktion sowie notwendige Änderungen erfolgen automatisiert und echtzeitnah.

Es ist dabei zu konstatieren, dass die für das Konzept notwendige Auflösung der klassische Hierarchie-Pyramide viele Unternehmen grundlegend verändern würde. Die Abkehr von manuellen Planungstätigkeiten und Ersetzung durch ein vollautomatisches Planungssystem dürfte mit hoher Skepsis der betroffenen Mitarbeiter verbunden sein, einem Akzeptanzproblem ist daher frühzeitig entgegenzuwirken.

Die Aufnahme, Speicherung und gezielte Verarbeitung von Informationen sind, neben der grundlegenden Veränderung des Informationsflusses, eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung des beschriebenen Konzepts. Dieses beruht auf der Annahme, dass neben den gewöhnlich vorliegenden meist statischen Stammdaten auch alle dynamischen Produktions-, Produkt- und Systemdaten zu jeder Zeit in Echtzeit vorliegen und verarbeitet werden können. In der Praxis stellt diese Art des Informationshandlings eine große Herausforderung dar. Neben fehlender Infrastruktur zur Aufnahme der notwendigen Daten sind (beispielsweise aufgrund der Nutzung verschiedener Systeme und Anwendungen) die unterschiedlichen Datenformate als problematisch anzusehen. Oft existieren gerade bei kleinen und mittelständischen Unternehmen nicht vollumfängliche oder inkonsistente Informationen, die eine reale Abbildung des Ist-Standes der Produktion unmöglich machen.

Generell ist das Ziel einer exakten digitalen Abbildung aller Produktionsprozesse und-abläufe (sog. digitaler Zwilling) nicht lückenlos zu erreichen. Viele Eigenschaften und sog. Softfacts können nicht aufgenommen werden und fließen somit (entgegen einer manuellen Planung) nicht in die digitale Planung ein. Oft haben in der Praxis nicht oder schwer zu erfassende Parameter (beispielsweise identische Maschinen mit unterschiedlichen Leistungskurven oder variable, mitarbeiterbezogene Leistungsunterschiede) einen erheblichen Einfluss auf die Planungsentscheidungen.

Trotz der kritikwürdigen Punkte überwiegen nach Meinung des Autors die Vorteile des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes gegenüber aktuell vorhandenen Konzepten. Derzeitige Fehlplanungen aufgrund von falschen oder fehlenden Informationen bzw. fehlende, zeitnahe Plananpassungen führen zu erheblichen Wirtschaftlichkeitsverlusten von Unternehmen. Zukünftig werden jene Unternehmen erfolgreicher agieren können, die ihre Ressourcen bestmöglich einsetzen und somit die Leistungsfähigkeit steigern.

Zur erfolgreichen Implementierung des vorgestellten, ganzheitlichen Konzepts zur Feinplanung einer HFS-Produktion bedarf es neuer Werkzeugen zur automatisierten Entscheidungsunterstützung, was zur Forschungsfrage 2 führt:

**F2:** Kann eine neue Methode entwickelt werden, die eine echtzeitfähige, prädikativ-reaktive Entscheidungsunterstützung der Fertigungsfineplanung ermöglicht?

Wie in Abschnitt 2.8 erläutert kommen aktuelle Feinplanungssysteme in Unternehmen mit einer HFS-Produktion als Aufrufsysteme zum Einsatz, sind größtenteils durch eine manuelle Planung gekennzeichnet und können die zukünftigen Anforderungen an die Feinplanung nicht erfüllen. Des Weiteren lässt die fehlende oder unvollständige Informationsgewinnung und -verarbeitung

bestehender Systeme eine exakte Abbildung des IST-Standes der Produktion nicht zu. Daher erfolgt die Feinplanung durch den Mitarbeiter, der oft nur einen Teil der Produktion betreut, unter unvollständiger Informationslage, welches sich im Ergebnis widerspiegelt. Die vorliegende, hohe Komplexität einer HFS-basierten Produktion macht es für die Planer unmöglich, alle Zusammenhänge zu erfassen, zu bewerten und anschließend in der Planung zu berücksichtigen. Erzeugt werden somit prädikative oder proaktive Pläne, die schnell veraltet sind und entsprechend zeitnah angepasst bzw. auf Aktualität geprüft werden müssen. Als größten Kritikpunkt an den bestehenden Planungssystemen sieht der Autor das mangelhafte robuste Verhalten im dynamischen Umfeld. Aufgrund (nahezu permanent) auftretender Ereignisse ist es zur Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen und bestmöglichen Zielerreichung notwendig, kontinuierlich eine Überprüfung des Plans durchzuführen. Dieses stellt den Planer oft vor eine unlösbare Aufgabe. In der Regel erfolgt die Produktion daher unter Anwendung veralteter Pläne, die zudem nur rudimentär mit folgenden oder vorgelagerten Fertigungsabschnitten abgestimmt und somit weit vom Gesamtoptimum entfernt sind. Besonders kritisch wird dieser Sachverhalt, wenn zur Zeit der Produktion (etwa in der Spät- oder Nachtschicht) kein Planer vor Ort ist, der eine Plananpassung vornehmen kann. Hohe wirtschaftliche Einbußen für die Unternehmen können die Folge sein.

Das in dieser Arbeit entwickelte Feinplanungssystem, bestehend aus einem zentralen Steuerungsmodul sowie den prädikativen und reaktiven Planungsmodulen, führt einen permanenten Abgleich der realen Ist- zur Soll-Situation durch und reagiert bei Bedarf umgehend (vgl. Abschnitt 4.2 ff.). Auftretende Störungen bzw. Abweichungen zum bestehenden Produktionsplan werden zeitnah erkannt und in die weitere Planung integriert. Das dazu entwickelte Störungsmanagement bildet die Grundlage der zweiten, reaktiven Phase des Planungskonzeptes. Betrachtet werden sowohl Kapazitäts- als auch Zeitabweichungen. Dabei erfolgt eine ganzheitliche Bewertung der neuen Datenlage mit dem Ziel, eine Plananpassung nur dann zu initialisieren, wenn der aktuelle Plan durch die Produktion nicht mehr umgesetzt werden kann. Unabhängig von der Verfügbarkeit des Planers ist damit zu jeder Zeit der durch das Feinplanungssystem bestmöglich generierte Produktionsplan vorliegend. Autark getroffene Fehlentscheidungen, etwa durch den operativen Maschinenbediener, und damit oft verbundene hohe Kosten werden vermieden.

Das Vorhandensein der notwendigen Informationen aus der Produktion bildet auch hier die Grundvoraussetzung einer erfolgreichen Implementierung. Erschwerend kommt hinzu, dass die erzielten und zurückgegebenen Ergebnisse des Feinplanungssystems für den operativen Mitarbeiter oft nicht nachvollziehbar sind. Dieser kennt meistens nur einen kleinen Bereich der Produktion und muss darauf vertrauen, dass die abteilungsübergreifende Gesamt-Performance des vorliegenden Fertigungsplans gegeben ist. Kommt es jedoch zu einem Akzeptanzproblem und somit zu einer Nichteinhaltung des vorgegebenen Plans, generiert das Feinplanungssystem (aufgrund der dann bewusst durchgeführten Störungen durch die Mitarbeiter) permanent neue, angepasste Fertigungspläne – auch für die vor- und nachgelagerten Fertigungsbereiche. Schon wenige Mitarbeiter, die sich nicht an den vorgegebenen Plan halten, würden eine permanente Planänderung (sog. hohe Planungsnervosität) hervorrufen, welche auch zu Akzeptanzproblemen in den ordnungsgemäß arbeitenden Fertigungsbereichen führen können. Besonders die Planer, die nur noch indirekt in die Fertigungsplanung eingreifen können, indem sie bestimmte Parameter verändern, müssen vom neuen Konzept der Feinplanung überzeugt sein. Diese Mitarbeiter haben oft einen großen Erfahrungsschatz und kennen viele Softfacts, die das automatisierte Feinplanungssystem (noch) nicht mitbewertet. Eine erfolgreiche Implementierung kann nur realisiert werden, wenn eine kontinuierliche Anpassung und Erweiterung des Feinplanungssystems erfolgt, und möglichst viele Fertigungsparameter erfasst werden.

Außerdem sollte eine professionelle Herangehensweise bei der Umstellung auf das automatisierte System gegeben sein, um die entstehenden Vorteile nutzen zu können. Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept eines Feinplanungssystems ermöglicht die echtzeitnahe Verarbeitung von diversen, abteilungsübergreifenden Informationen und kann situativ angepasst auf Störungen reagieren. Eine deutliche Steigerung der Produktionsperformance wird als Resultat erwartet.

Aktuelle Planungsergebnisse, die durch den Einsatz verschiedener, derzeit eingesetzter Verbesserungsverfahren entstehen, werden den zukünftigen Anforderungen nicht gerecht (vgl. Abschnitt 3.4). Die Forschungsfrage 3 nimmt sich diesem Thema an.

**F3:** Lassen sich Verfahren zur Feinplanung entwickeln, welche durch die Kombination von hybriden Simulationsmodellen und heuristischen Optimierungsalgorithmen onlinefähige Lösungen generieren, die trotz komplexer Problemstellungen den hohen Qualitätsanforderungen gerecht werden?

Die positiven Erkenntnisse aus den aufgeführten Arbeiten an der Otto-von Guericke- Universität Magdeburg (vgl. Abschnitt 3.3.3) hinsichtlich einer Kopplung von unterschiedlichen Simulationsansätzen mit verschiedenen Optimierungsverfahren waren ausschlaggebend für eine Weiterverfolgung dieses Ansatzes, um die vorliegende komplexe Problemstellung zu lösen. Zur Implementierung des vorgestellten Konzepts in eine praxisnahe Produktionsumgebung wurde das MISO-Verfahren entwickelt. Aufgrund des modularen Aufbaus ist ein Einsatz bei vielen unterschiedlichen Ausprägungsformen einer HFS- basierten Produktion möglich. Prinzipiell können beliebig viele Stufen und (heterogene) Maschinen auf den Stufen betrachtet und analysiert werden. Häufig vorkommende reihenfolgeabhängige Rüstzeiten aufgrund von Produkt- oder Maschinenfamilien werden dabei berücksichtigt. Das Zusammenspiel der Algorithmen erzeugt bei jedem Simulationslauf einen Produktionsplan, der

- eine gleichmäßige Auslastung der Maschinen einer Stufe,
- eine bestmögliche Produktfamilien- und somit Rüstreihenfolge sowie
- eine termingerechte Einplanung aller freigegebenen Aufträge

zum Ziel hat. Anhand von umfangreich durchgeführten Experimenten konnte der Nachweis erbracht werden, dass das MISO-Verfahren im Vergleich zu derzeit eingesetzten Feinplanungsverfahren teilweise deutlich bessere Resultate erzielt (vgl. Abschnitt 6.3 ff.). Das Ergebnis wird unterstrichen durch die Betrachtung unterschiedlicher Gewichtungen der ausgewählten Zielgrößen. Im Mittel erreichte MISO die mit Abstand besten Werte aller betrachteten Verfahren. Mit einer benötigten Rechenzeit von durchschnittlich nur 1,5 Sekunden pro Simulationslauf stehen die Ergebnisse echtzeitnah bereit und können synchron zur laufenden Produktion berücksichtigt werden.

Die in Kapitel 6 insgesamt fünf betrachteten Szenarien sind in Bezug auf die Größe des HFS-Problems (und der daraus resultierenden Komplexität) vergleichbar mit realen Produktionsumgebungen produzierender Unternehmen. Hervorzuheben ist, dass das entwickelte MISO-Verfahren in den durchgeführten Experimenten die aktuell eingesetzten Verbesserungsverfahren teilweise deutlich dominiert (vgl. Abschnitt 6.4). Nachweislich erzielt das MISO-Verfahren im Vergleich mit durchschnittlich 16.679 min/ Datensatz die geringste und damit beste Zykluszeit des MAX-Szenarios (welches mit 4 Produktionsstufen und insgesamt 17 Maschinen die in dieser Arbeit größte betrachtete Komplexität darstellt). Gemäß dem zu Grunde liegenden Schichtmodell werden demnach ca. 12,8 Tage

zur Bewältigung des Auftragsbestandes benötigt. Die aktuell mehrheitlich eingesetzten Verfahren EDD und SPT benötigen für den gleichen Auftragsbestand ca. 3,6 bzw. ca. 3,8 Schichten mehr. Diese Tendenz der Ergebnisse lässt sich auch auf die anderen betrachteten Szenarien übertragen und zeigt die Dominanz des entwickelten MISO-Verfahrens.

Die genutzten Parameter der Experimente wurden möglichst praxisorientiert gewählt. Verwendete Auftragsdaten stammen aus einem produzierenden mittelständischen Unternehmen, welches einer HFS-basierten Produktion unterliegt. Gleichwohl besitzen die erzielten Ergebnisse nach Meinung des Autors einen experimentellen, theoretischen Charakter. Viele Einflussgrößen, die zur Planung der Produktion sinnvoll erscheinen, fließen aktuell nicht in das MISO-Verfahren ein. Die Planung beruht auf statischen Eingangsgrößen und Annahmen. Das Verfahren geht davon aus, dass zu Beginn der Planerstellung alle relevanten Informationen vorliegen, was in der Praxis oft nicht gewährleistet ist. Den in Abschnitt 2.8.4 gestellten Anforderungen an zukünftige Feinplanungsverfahren, Qualität der Lösung und Rechenzeit, wird das MISO-Verfahren trotzdem eindrucksvoll gerecht. Somit kann auch die Forschungsfrage F3 positiv beantwortet werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion entwickelt. Bestehend aus einem ganzheitlichen Konzept zur echtzeitfähigen Feinplanung einer HFS-Produktion, welches den Entwurf eines selbstständig agierenden Feinplanungssystems zur prädikativ-reaktiven Entscheidungsfindung sowie die Entwicklung von neuen, hybriden Feinplanungsverfahren zur Lösung von komplexen Problemen einschließt, wird sie den zukünftigen Anforderungen einer echtzeitfähigen Entscheidungsunterstützung gerecht. Das dazu entwickelte MISO-Verfahren nutzt einen hybriden Simulationsansatz, der ereignisdiskrete und ratenbasierte Simulation kombiniert und damit die Vorteile beider Arten vereinigt. Zusätzlich werden neue, heuristische Optimierungsalgorithmen integriert, die eigens in dieser Arbeit zur Lösung von HFS-Problemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten entwickelt werden. Das jeweils vorliegende Optimierungsproblem wird dabei stufenweise in Einzelprobleme zerlegt, gelöst und die Ergebnisse anschließend zusammengefügt. Durch die Kopplung von ereignisdiskreten und ratenbasierten Prozessen entsteht ein Simulationsmodell mit mesoskopischem Charakter. Die vorliegende Arbeit kann somit auch als weiterführende Untersuchung zur 2011 vorgestellten Dissertation der mesoskopischen Modellierung von Reggelin verstanden werden [Reggelin 2011, S.114].

Prinzipiell können auch andere Verbesserungsverfahren zur Lösungsfindung in das Feinplanungssystem integriert werden. Denkbar ist die Nutzung von vielen unterschiedlichen Verfahren (etwa aus dem Bereich des Maschinellen Lernens), die im Bedarfsfall parallel gestartet werden. Ein anschließender Vergleich und die entsprechende Auswahl der besten erzielten Lösung würde sich anschließen. Grundvoraussetzung wäre eine ähnliche, echtzeitfähige Rechenzeit.

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente in Kapitel 6 haben gezeigt, dass das entwickelte Verfahren bei den betrachteten Problemstellungen deutliche Vorteile gegenüber den aktuell eingesetzten Verfahren aufweist. Eine weiterführende Betrachtung des vorgestellten Ansatzes sollte daher angestrebt werden.

Mit dem Ziel einer erfolgreichen Implementierung in reale Produktionsumgebungen erscheinen u. a. folgende, Untersuchungen als sinnvoll:

- Zur softwarebasierten Umsetzung des entwickelten Konzepts sollte eine Auswahl geeigneter Anbieter getroffen und evaluiert werden.
- Es sollten weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Einsatzfähigkeit des MISO-Verfahrens mit Unternehmen erfolgen, die über unterschiedliche HFS-basierte Produktionsstrukturen verfügen.
- Weiterhin muss untersucht werden, inwiefern das entwickelte MISO-Verfahren auch für Produktionssysteme mit unterschiedlicher Fertigungsstruktur wertvolle Ergebnisse erzeugen kann. Das Vorhandensein von produktionsfamilienabhängigen Rüstzeiten kann dabei als ein weiteres Indiz eines potenziell erfolgreichen Einsatzes sein.
- Prinzipiell ist die Integration von alternativen Feinplanungsverfahren in die entwickelte Methodik zur echtzeitfähigen Fertigungsfeinplanung einer Hybrid-Flow-Shop – Produktion

denkbar und sinnvoll. Weitergehende Untersuchungen dazu wurden bereits mit dem kooperierenden EMS-Dienstleister gestartet. Zukünftig sollten mehrere leistungsfähige Verfahren in das Konzept integriert werden, um noch bessere und robustere Lösungen zu erzeugen.

## Literaturverzeichnis

- Adam, D.: Produktions-Management. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1997.
- Adams, J.; Balas, E.; Zawack, D.: The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. *Management Science*, Vol. 34, No. 3, 1988, S. 391–401.
- Adler, L.; Fraiman, N.; Kobacker, E.; Pinedo, M.; Plotnicoff, J. C.; Wu, T. P.: A scheduling support system for the packing industry. *Journal Operations-Research*, 1993, S. 641–648.
- Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; Orlin, J. B.: *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- Akturk, M. S.; Gorgulu, E.: Match-up scheduling under a machine breakdown. *European Journal of Operational Research*, 1999, S. 81–97.
- Alvarez-Valdes, R.; Fuertes, A.; Tamarit, J. M.; Gimenez, G.; Ramos, R.: A heuristic to schedule flexible job-shop in a glass factory. *European Journal of Operational Research*, 2005, S. 525–534.
- Amiri, R.; H. Mehrpouyan; L. Fridmann; R. K. Mallik: A Machine Learning Approach for Power Allocation in HetNets Considering QoS . In: *IEEE ICC*, 2018.
- Andelfinger, V. P.; Hänisch, T.: *Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- Arnold, D.; Furmans, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Arping, H.: Beitrag zur rechnergestützten Fertigungsregelung mit automatischer Entscheidungshilfe im Störfall bei Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, Aachen, 1977.
- Ashby, W. R.: *Introduction to Cybernetics*. MARTINO FINE Books, 1956.
- Aufenanger, M.: *Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme*, Paderborn, 2009.
- Aurich, P.: *Simulationsbasierte Optimierung von Hybrid-Flow-Shop Scheduling- Problemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten*. Masterarbeit, Magdeburg, 2017.
- Aurich, P.; Nahhas, A.; Reggelin, T.; Tolujew, J.: Heuristic and Metaheuristic Simulation-Based Optimization for Solving a Hybrid-Flow Shop Scheduling Problem. *The 15th International Conference on Modeling and Applied Simulation*, 2016a, S. 95–103.
- Aurich, P.; Nahhas, A.; Reggelin, T.; Tolujew, J.: Simulation-Based Optimization for a hybrid Flow Shop Scheduling Problem. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, edited by T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and S. E. Chick, School of Operations Research and Information Engineering Cornell University 206 Rhodes Hall Ithaca, NY 14853, USA, 2016b.

- Aytug, H.; Lawley, M. A.; McKay, K.; Mohan, S. und Uzsoy, R.: Executing production schedules in the face of uncertainties.: A review and some future directions. *European Journal of Operational Research*, 2005, Band 161, S. 86–110.
- Baker, K. R.; Trietsch, D.: *Principles of sequencing and scheduling*. Hoboken, NJ, USA: Wiley. Hoboken, NJ, USA, 2009.
- Bamberger, R.: *Entwicklung eines Werkzeuges zum Störungsmanagement in der Produktionsregelung*. Dissertation, Stuttgart, 1996.
- Bartels, B.; Kuther, M.: *Wie Obsoleszenz-Management Produktionskosten reduziert*; Zugriff am 02.02.2020.
- Bauernhansl, T.; Hompel, M. t.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- Baumgartner, K. M.; Wah, B. W.: *Computer Scheduling Algorithms: Past, Present and Future*. *Information Sciences*, 1991, Vol. 57–58, S. 319–345.
- Bechte, W.: Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research* 26, 1988, S. 375–395.
- Beckendorff, U.: *Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung*. Dissertation, Hannover, 1991.
- Begemann, C.: *Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung*. Dissertation, Hannover, 2005.
- Bell, H.: *Reflowlötten: Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler ; mit 41 Tabellen*. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2005.
- Ben-Daya, M.; Al-Fawzan, M.: A tabu search approach for the flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 1998, S. 88–95.
- Bergmann, S.: *Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen*. Dissertation, Ilmenau, 2013.
- Bergmann S.; Strassburger S.: Challenges for the automatic generation of simulation models for production systems. Ottawa, Canada. *Proceedings of the 2010 Summer Simulation Multiconference*, 2010, S. 545–549.
- Betge, D.: *Koordination in Advanced Planning and Scheduling-Systemen*. DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2006.
- Biethahn, J.; Hummeltenberg, W.; Schmidt, B.; Stähly, P.; Witte, T.: *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: State of the Art und neuere Entwicklungen*. Physica-Verlag HD, Heidelberg, 1999.
- Blackstone, J. H.; Phillips, D. T.; Hogg, G. L.: A-State-of-the-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations. *International Journal of Production Research*, 1982, S. 27–45.



- Bley, H.; Jostock, J.; Reck, K.: Order control by a hierarchical, selforganizing computer system. *Annals of the CIRP* 44, 1995, S. 407–411.
- Bloech, J.; Bogaschewsky, R.; Buscher, U.; Daub, A.; Götze, U.; Roland, F.: *Einführung in die Produktion*. Springer Gabler, Berlin, 2014.
- Borshchev, A.; Filippov, A.: From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, 2004.
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- Brackel, T.: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen*. Paderborn, Dissertation, Gabler, Wiesbaden, 2009.
- Braess, H.-H.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik: Mit 122 Tabellen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- Brah, S. A.: *Scheduling in a flow shop with multiple processors*. Dissertation, Houston, 1988.
- Brankamp, K.: *Ein Terminplanungssystem für Unternehmen der Einzel- und Serienfertigung: Voraussetzungen, Gesamtkonzeption und Durchführung mit EDV*. Physica-Verlag HD, Heidelberg, 1973.
- Breithaupt, J.-W.; Land, M.; NYHUIS, P.: The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release. *Production Planning & Control* 13, 2002, S. 625–638.
- Brinzer, B.: *Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation, Stuttgart, 2005.
- Brockmann, K.; Dangelmaier, W.; Holthöfer, N.: Parallel Branch & Bound Algorithm for Makespan Optimal Scheduling in Flow Shops with Multiple Processors. *Operations Research Proceedings*, 1997, S. 428–433.
- Brucker, P.: *Scheduling Algorithms*. Springer, Berlin, New York, 2007.
- Brüggemann, D.: *Ein parametrisierbares Verfahren zur Änderungsplanung für den Flexible Flow Shop mit integrierter Schichtmodellauswahl*, Paderborn, 2010.
- Brynjolfsson, E.; Hitt, L. M.; Kim, H. H.: *Strength in Numbers: How Does Data-Driven Decisionmaking Affect Firm Performance*, 2011.
- Burke, E. K.; Kendall, G. (Hrsg.): *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. Springer US; Imprint; Springer, Boston, MA, 2014.
- Burstein, M. H.; McDermott, D. V. (Hrsg.): *Issues in the development of human-computer mixed-initiative planning*. 1996.
- Busch, U.: Bestandsgeregelte Durchfluss-Steuerung (BGD). *CIM Management* 3, 1987, S. 18–26.

- Buxey, G.: Production Scheduling: Practice and Theory. *European Journal of Operational Research*, 1989, S. 17–31.
- CAD-UL: Der Leiterplatten-Nutzen, [www.cad-ul.de/newsletter/leiterplatten-nutzen.php](http://www.cad-ul.de/newsletter/leiterplatten-nutzen.php). Stand: 19.02.2020
- CAD-UL: Lackierung elektrischer Baugruppen, <https://www.cad-ul.de/faq/elektronischen-baugruppen-lackieren.php>. Stand: 19.02.2020
- Cerny, V.: Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem.: An Efficient Simulated Algorithm. *Journal of Optimization Theory and Application*, 1985, S. 41–51.
- Chen, C. L.; Chen, C. L.: Bottleneck-based heuristics to minimize tardy jobs in a flexible flow line with unrelated parallel machines. *International Journal of Production Research*, 2008, S. 6415–6430.
- Cheng, R.; Gen, M.; Tozawa, T.: Minmax earliness/tardiness scheduling in identical parallel machine system using genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 1995, S. 513–517.
- Corsten, H.: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. Oldenbourg, München, 2007.
- Damiron, C.; Nastasi, A.: Discrete Rate Simulation Using Linear Programming. *Proceedings of the 40th Conference on Winter simulation: Winter Simulation Conference*, 2008, S. 740–749.
- Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung Grundlagen, Algorithmen und Beispiele. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- Dangelmaier, W.: Produktionstheorie. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- Dangelmaier, W.; Warnecke, H.-J.: Fertigungslenkung: Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- Daub, A.: Ablaufplanung: Modellbildung, Kapazitätsabstimmung und Unsicherheit. Eul, Bergisch Gladbach, 1994.
- Dimitrov, T.: Permanente Optimierung dynamischer Probleme der Fertigungssteuerung unter Einbeziehung von Benutzerinteraktionen. Dissertation, 2015.
- Dittes, F.-M.: Komplexität: Warum die Bahn nie pünktlich ist. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2012.
- Dittrich, B.: Optimierungsverfahren im supply chain management. Diplom De, [Place of publication not identified] 2001.
- Domschke, W.: Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte. Springer, Berlin, 1997.
- Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Springer, Berlin, 2002.
- Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2015.

- Dorn, J.; Kerr, R.; Thalhammer, G.: Reactive Scheduling in a Fuzzy-Temporal Framework. In: Szelke, E.; Kerr, R. M. (Hrsg.): Knowledge-Based Reactive Scheduling. North-Holland, Amsterdam, 1994, S. 39–55.
- Dréo, J.: Metaheuristics for hard optimization: Simulated annealing, tabu search, evolutionary and genetic algorithms, ant colonies ... ; methods and case studies. Springer, Berlin, 2010.
- Duffie, N. A.; Falu, I.: Control-Theoretic Analysis of a Closed-Loop PPC System. CIRP Annals - Manufacturing Technology 51, 2002, S. 379–382.
- EHK: Ursachen von Insolvenzen.: Gründe für Unternehmensinsolvenzen aus der Sicht von Insolvenzverwaltern. Veröffentlichung der Euler Hermes Kreditversicherungs AG, Hamburg. Wirtschaft Konkret, 2006.
- EPP: AOI Prüfung nach dem Löten, <https://epp.industrie.de/allgemein/3d-aoi-pruefung-nach-dem-loeten-simon-davis-orbotech-schuh-bad-pyrmont/>. Stand: 17.02.2020
- Eßig, M.; Wagner, S. M.: Strategien in der Beschaffung. Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung, 2003.
- Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern W.; Schröder H.-H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1534–1544.
- Feilke, R.: Simulationsbasierte Optimierung zur Lösung von Maschinenbelegungsproblemen. Masterarbeit, Magdeburg, 2016.
- Fleisch, E.; Christ, O.; Dierkes, M.: Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: Fleisch, E.; Mattern, F. (Hrsg.): Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen ; mit 21 Tabellen/ edited by Elgar Fleisch, Friedemann Mattern. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005, S. 3–37.
- Forrester, J. W.: Industrial Dynamics—After the First Decade. Management Science, 1968, S. 398–415.
- Fox, M. S.; Smith, S. F.: ISIS: A knowledge-based system for factory scheduling. Expert Systems 1, 1984, S. 25–49.
- Frank, M.; Lorenz, P.: Simulation diskreter Prozesse. Eine Einführung für den Anwender. Fachbuchverlag (Mathematik für Ingenieure), Leipzig, 1979.
- Fransoo, J. C.; Wäfler, T.; Wilson, J. R.: Behavioral Operations in Planning and Scheduling. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- FWW: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft, Berlin, 2013.
- Gendreau, M. (Hrsg.): Handbook of metaheuristics. Springer US, Berlin, 2010.

- Georgi, G.: Job Shop scheduling in der Produktion: Einsatzorientierte Lösungen für ein Kernproblem der Produktionsplanung und -steuerung bei mittleren Auftragszahlen und variierenden Einsatzbedingungen. *Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge*, 1995.
- Gholami, M.; Zandieh, M.; Alem-Tabriz, A.: Scheduling hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, S. 189–201.
- Gienke, H.; Kämpf, R.; Aldinger, L. (Hrsg.): *Handbuch Produktion: Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling*. Hanser, München, 2007.
- Gierth, A.; Schmidt, C.: Zeitdynamische Simulation in der Produktion. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte*. Springer, Dordrecht, 2007, S. 646–681.
- Glover, F.: Heuristics For Integer Programming Using Surrogate Constraints. *Decision Sciences*, 1977, S. 156–166.
- Glover, F.; Laguna, M.: *Tabu search*. Kluwer, Boston, MA, USA, 1997.
- Gondek, V.: *Hybrid-Flow-Shop Scheduling mit verschiedenen Restriktionen: Heuristische Lösung und LP-basierte untere Schranken*. Dissertation, 2011.
- Gordon, G.: A general purpose systems simulation program. Eastern joint computer conference: computers - Key to total systems control, 1961, S. 87–104.
- Gottmann, J.: *Produktionscontrolling: Wertströme und Kosten optimieren*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.
- Graham, R. L.; Lawler, E. L.; Lenstra, J. K.; Rinnooy Kan A.: Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 1979, S. 287–326.
- Graves, S. C.: Safety Stocks in Manufacturing Systems. *International Journal of Operations Management* 1, 1988, S. 67–101.
- Guinet, A.; Solomon, M. M.; Kedia, P. K.; Dussauchoy, A.: A computational study of heuristics for two-stage flexible flowshops. *International Journal of Production Research*, 1996, S. 1399–1416.
- Gündling, C.: *Letzter Aufruf Kundenorientierung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- Günter, B.; Helm, S.: *Kundenwert: Grundlagen - Innovative Konzepte - Praktische Umsetzungen*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2006.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg, 2012.
- Guo, B.; Nonaka, Y.: Rescheduling and optimization of schedules considering machine failures. *International journal of production economics*, 1999, S. 503–513.

- Gupta, J. N. D.: Two-Stage, Hybrid Flowshop Scheduling Problem. *Journal of the Operations Research Society*, 1988, S. 359–364.
- Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1971.
- Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. VDI-Verl., Düsseldorf, 1984.
- Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. VDI-Verl., Düsseldorf, 1989.
- Hahn, D.: *PuK: Planung und Kontrolle, Planungs- und Kontrollsysteme, Planungs- und Kontrollrechnung ; Controllingkonzepte ; Unternehmensbeispiele von Henkel KGaA, Düsseldorf, Daimler-Benz AG, Stuttgart, Siemens AG, München, Preussag AG, Hannover*. Gabler, Wiesbaden, 1996.
- Haupt, R.: A survey of priority rule based scheduling. *OR-Spektrum*, 1989, S. 3–16.
- Häusler, J.: *Planung als Zukunftsgestaltung: Voraussetzungen, Methodik und Formen der Planung in soziotechnischen Systemen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 1969.
- Havill, J. T.; Mao, W.: On-line algorithms for hybrid flow shop scheduling. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Science and Informatics*, 1998, S. 134–137.
- Heger, J.: *Dynamische Regelselektion in der Reihenfolgeplanung: Prognose von steuerungsparametern mit gaußschen prozessen*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- Helm, S.; Günter, B.; Eggert, A.: *Kundenwert: Grundlagen - Innovative Konzepte - Praktische Umsetzungen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- Henning, G. P.; Cerda, J.: Knowledge-based predictive and reactive scheduling in industrial environments. *Computers & Chemical Engineering* 24, 2000, S. 2315–2338.
- Henseler, H.: *Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten*. Dissertation, Oldenburg, 1998.
- Hentze, J.; Brose, P.; Kammel, A.: *Unternehmensplanung - eine Einführung*. UTB-Verlag, Bern, Stuttgart, Wien, 1993.
- Herrler, R.: *Agentenbasierte Simulation zur Ablaufoptimierung in Krankenhäusern und anderen verteilten, dynamischen Umgebungen*. Dissertation, Würzburg, 2007.
- Herroelen, W.; Leus, R.: Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research* 165, 2005, S. 289–306.
- Hesse, M.; Frölich: *Software-Entwicklung – Vorgehensmodelle, Projektführung, Produktverwaltung: Handbuch der Informatik*, Oldenbourg, 1992.
- Heyn, M.: *Methodik zur Schichtstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen*. Dissertation, 1999.

- Holland, J. H.: Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press Cambridge, London, 1975.
- Hoogeveen, J. A.; Lenstra, J. K.; Veltman, B.: Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessorflow shop is NP-hard. European Journal of Operational Research, 1996, S. 172–175.
- Hopp, W.; Spearman, M.: Factory physics: foundations of manufacturing management. Irwin, 2011.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics - Foundation of manufacturing management. McGraw-Hill/Irwin, New York, 2001.
- Hoppe, G.: High Performance Automation verbindet IT und Produktion. In: Hompel, M. t.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Springer Vieweg; ProQuest, Berlin, 2017, S. 119–144.
- Hoss, K.: Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden. Physica-Verlag, Würzburg, 1965.
- Hunsucker, J. L.; Shah, J. R.: Comparative performance analysis of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment. European Journal of Operational Research, 1994, S. 102–114.
- Ishibuchi, H.; Misaki, S.; Tanaka, H.: Modified simulated annealing algorithms for the flow shop sequencing problem. European Journal of Operational Research, 1995, S. 388–398.
- Jaehn, F.; Pesch, E.: Ablaufplanung: Einführung in Scheduling. Springer Gabler, Berlin, 2014.
- Jedermann, R.; Gehrke, J. D.; Lorenz, M.; Herzog, O.; Lang, W.: Realisierung lokaler Selbststeuerung in Echtzeit: Der Übergang zum intelligenten Container. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Wissenschaft und Praxis im Dialog: Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung [3. Wissenschaftssymposium Logistik in Dortmund]. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2006, S. 145–166.
- JF: Pönale: Vertragsstrafe im Wettbewerbsrecht,  
<https://www.juraforum.de/lexikon/poenale#vertragsstrafe-im-wettbewerbsrecht>. Stand: 17.11.20120
- Johnson, S. M.: Optimal Two- or Three-stage Production Schedules with Setup Times included. Naval Research Logistics, 1954, S. 61–68.
- Jostock, J.: Aufbau eines hierarchisch organisierten, wissensunterstützten Fertigungsregelungssystems. Dissertation, Saarbrücken, 1994.
- Józefowska, J.; Mika, M.; Róglarz, J.: Local search metaheuristics for discrete - continuous scheduling problems. European Journal of Operational Research, 1998, S. 354–370.
- Kadipasaoglu, S. N.; Xiang, W.; Khumawala, B. M.: A comparison of sequencing rules in static and dynamic hybrid flow systems. International Journal of Production Research 35, 1997, S. 1359–1384.

- Kang, M.: Entwicklung eines Werkstattsteuerungssystems mit simultaner Termin- und Kapazitätsplanung. Dissertation, Berlin, 1987.
- KE: Reflow-Löten: electronics-production-equipment, <https://www.kurtzsa.de/electronics-production-equipment/loetlexikon/begriff/reflow-loeten.html>. Stand: 13.05.2020
- Kersten, W.; Koeppen, B.; Meyer, C. M.; Kern, E.-M.: Reduktion der Prozesskomplexität durch Modularisierung. Industrie-Magazin, 2005, 04-2005.
- Kettner, H.; Bechte, W.: Neue Wege der Fertigungssteuerung durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe. VDI-Z 123, 1981, S. 459–465.
- Kettner, H.; Jendralski, J.: Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung - Ein Sorgenkind der Produktion. VDI-Z 121, 1979, S. 410–416.
- Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M.: Produktions- Management: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung., München, Oldenbourg, 2012.
- Kienzle, F.: Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten. Dissertation, Chemnitz, 2011.
- Kingsman, B. G.; Tatsiopoulos, I. P.; Hendry, L. C.: A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. European Journal of Operational Research, 1989a, S. 196–206.
- Kingsman, B. G.; Tatsiopoulos, I. P.; Hendry, L. C.: A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. European Journal of Operational Research 40, 1989b, S. 196–206.
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P.: Optimization by Simulated Annealing. Science 220, 1983, S. 671–680.
- Kirkpatrick, S., C.; Gerlatt, M. V.: Optimization by Simulated Annealing. Science, 1983, S. 671–680.
- Kis, T.; Pesch, E.: A review of exact solution methods for the non-preemptive multiprocessor flowshop problem. European Journal of Operational Research 40, 1989, S. 196–206.
- Kistner, K.-P.; Steven, M.: Produktionsplanung. Physica-Verlag HD, Heidelberg, 2001.
- Klein Wassink, R. J.; Müller, B. F.; Wassink, R. J. K.; Klein-Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik: Mit 116 Tabellen im Text ; [eine ausführliche Abhandlung über das Löten oberflächenmontierter und bedrahteter Bauteile. Leuze, Saulgau/Württ., 1991.
- Klemmt, A.: Ablaufplanung in der Halbleiter- und Elektronikproduktion: Hybride Optimierungsverfahren und Dekompositionstechniken. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2011. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- Kochhar, S.; Morris, R.J.T.: Heuristic methods for flexible flow line scheduling. Journal of Manufacturing Systems, 1987a, S. 299–314.
- Kochhar, S.; Morris, R.J.T.: Heuristic methods for flexible flow line scheduling. Journal of Manufacturing Systems, 1987b, S. 299–314.

- Kreimeier, D.: Konfigurierbares mikrorechnergestütztes Planungshilfsmittel zur Feinsteuerung autonomer Fertigungsstrukturen. Dissertation, Bochum, 1987.
- Krishnamurthy, A.; Suri, R.: Planning and implementing POLCA: a card-based control system for high variety or custom engineered products. *Production Planning & Control* 20, 2009, S. 596–610.
- Krog, E.-H.: Das kundengesteuerte Unternehmen von der Bestellung bis zur Auslieferung., Stuttgart, 2006.
- Kuhn, A.; Rabe, M. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998.
- Kuhn, A.; Wiendahl, H.-P.; Reinhart, G.: Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik: Mit 194 Abbildungen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1993.
- Kuhnle, A.; L. Schäfer; N. Stricker; G. Lanza: Design, Implementation and Evaluation of Reinforcement Learning for an Adaptive Order Dispatching in Job Shop Manufacturing Systems. In: 52<sup>nd</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2019.
- Kulcsár, G.; Erdélyi, F.; Hornyák, O.: Multi-Objective Optimization and Heuristic Approaches for Solving Scheduling Problems. *IFAC Workshop on Manufacturing Modeling, Management and Control*, 2007, S. 127–132.
- Kupec, T.: Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen. Dissertation, München, 1991.
- Kurbel, K.; Endres, A.: Produktionsplanung und -steuerung: Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. Oldenbourg, München, 1995.
- Kurz, M. E.; Askin, R. G.: Scheduling flexible flow lines with sequencedependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 2004, S. 66–82.
- Lang, S., T. Reggelin, F. Behrendt, A. Nahhas: Evolving Neural Networks to Solve a Two-Stage Hybrid Flow Shop Scheduling Problem with Family Setup Times. In: *Proceedings of the 53rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2020)*, January 7th -10th, Wailea, HI, 1298–1307, 2020.
- Land, M.; Gaalman, G.: Workload control concepts in job shops - A critical assessment. *International journal of production economics* 46, 1996, S. 535–548.
- Laufenberg, L.: Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Dissertation, RWTH Aachen, 1995.
- Li, X.; Liu, L.; Wu, C.: A fast method for heuristics in large-scale flow shop scheduling. *Tsinghua Science & Technology*, 2006.
- Linn, R.; Zhang, W.: Hybrid flow shop scheduling: A survey. *Computers & Industrial Engineering* vol. 37, 1999, S. 57–61.
- Little, J.D.C.: A proof of the queuing formula:  $L=\text{Lambda}$ . 383–387, 1961.



- Lödning, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Zugleich Dissertation Universität Hannover, 2001. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2: Fertigungstechnik Band 587, 2001.
- Lödning, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- Lödning, H.; Wiendahl, H.-P.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 2004. Springer, Berlin, 2005.
- Low, C.: Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines. *Computers and Operations Research*, 2005, S. 2013–2025.
- Lucke, H.-J.: Systemtheoretische Grundlagen der Logistik. In: Krampe, H., Lucke (Hrsg.): *Grundlagen der Logistik - Theorie und Praxis logistischer Systeme*. Huss-Verlag, München, 2006, S. 35–54.
- Luczak, H.; Eversheim, W. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 1999.
- Lugner, A. E.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Carl Hanser Verlag, München, 1987.
- Luhmann, N.: Komplexität. In: Grochla, E. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Organisation*. Poeschel Verlag, Stuttgart, 1980, S. 1064–1070.
- Lyneis, J. M.: System dynamics for market forecasting and structural analysis. *System Dynamics Review*, 2000, S. 3–25.
- MacCarthy, B. L.; MacCarthy, B.; Wilson, J. R.: *Human Performance in Planning and Scheduling*. Crc Pr Inc, Tokyo, 2001.
- Mack, C. A.: Fifty Years of Moore's Law. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2011.
- Mahajan, K. R.: *A Combined Simulation and Optimization Based Method for Predictive-Reactive Scheduling of Flexible Production Systems Subject to Execution Exceptions*. Dissertation, Paderborn, 2007.
- Märtens, A.; Elswier, M.; Nickel, R.: Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* 97, 2007a, S. 471–478.
- Märtens, A.; Elswier, M.; Nickel, R.: Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* 97, 2007b, 6, S. 471–478.
- Martin, C.: *Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz*. Dissertation, München, 1998.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- Mather, H., Plossl, G. W.: Priority fixation versus throughput planning. Cleveland, Ohio (USA). *Proceedings of the APICS International Conference*, 1977, S. 27–51.

- McKay, K.; Safayeni, F.; Buzacott, J.: Job Shop Scheduling Theory: What is Relevant? *Interfaces*, 1988, S. 84–90.
- McKay, K. N.; Wiers, V. C.S.: The Organizational Interconnectivity of Planning and Scheduling. In: Meystel, A.; Jorna, R.; van Wezel, W. (Hrsg.): *Planning in intelligent systems: Aspects, motivations, and methods*. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J, 2006, S. 175–201.
- Metha, S. V.; Uzsoy, R. M.: Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14, 1998, S. 365–378.
- Meyers: *Konversationslexikon*. BI, Leipzig, 1987.
- Meystel, A.; Jorna, R.; van Wezel, W. (Hrsg.): *Planning in intelligent systems: Aspects, motivations, and methods*. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J, 2006.
- Mirsanei, H. S.; Zandieh, M.; Moayed, M. J.; Khabbazi, M. R.: A simulated annealing algorithm approach to hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing* vol. 22, 2011a, S. 965–978.
- Mirsanei, H. S.; Zandieh, M.; Moayed, M. J.; Khabbazi, M. R.: A simulated annealing algorithm approach to hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing* vol. 22, 2011b, S. 965–978.
- Moreira, M. R.; Alves, R. A.: A methodology for planning and controlling workload in a job-shop: a four-way decision-making problem. *International Journal of Production Research* 47, 2009, S. 2805–2821.
- Mosler, A.: *Integrierte Unternehmensplanung: Anforderungen, Lösungen und Echtzeitsimulation im Rahmen von Industrie 4.0*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017.
- Mößmer, H. E.; Schedlbauer M.; Günthner, W. A.: Die automobiler Welt im Umbruch. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik: Die Vision der Supra-Adaptivität*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 3–15.
- Nahas, A.: *Integrated-Simulation-Based Optimization approach for solving a hybrid flow shop scheduling problem*. Bachelor-Arbeit, Magdeburg, 2015.
- Nahas, A.: *Heuristic and Metaheuristic Simulation-Based Optimization for Solving Hybrid Flow Shop Scheduling Problems*. Masterarbeit, Magdeburg, 2017.
- Nebi, T.: *Produktionswirtschaft*. Oldenbourg, München, 2011.
- Neidhardt, U.: *Einsatz von Prioritätsregeln zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen*. Dissertation, Rostock, 2007.
- Neuhaus, U.: *Reaktive Planung in der chemischen Industrie: Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008.
- Nickel, S.; Stein, O.; Waldmann, K.-H.: *Operations Research*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

- Niehues, M. R.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Dissertation, München, 2016.
- Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1997.
- Nittka, F.: Koordinierung der Fertigung in teilautonomen Bereichen durch Bestandsregelung und Simulation. Dissertation, Aachen, 1995.
- Norman, B. A.: Scheduling flowshops with finite buffers and sequence-dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, S. 163–177.
- Nowicki, E.; Smutnicki, C.: The flow shop with parallel machines: A tabu search approach. *European Journal of Operational Research*, 1998, S. 226–253.
- Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; PZH Produktionstechnisches Zentrum, Hannover, Garbsen, 2008.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Teilw. zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 1999. Springer, Berlin, 2003.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Ansatz zu einer Theorie der Produktionstechnik. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2010, S. 15–20.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- NYHUIS, P.; Hartmann, W.; Kennemann, M.; Münzberg, B.: Produktionsregelung mit logistischen Kennlinien. *Wt Werkstatttechnik* 99, 2009, S. 239–243.
- NYHUIS, P.; MEERS, S.; GÄRTNER H.: Logistische Herausforderungen in Produktionsnetzen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2010, S. 949–952.
- Obermaier, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.
- Ogbu, F.; Smith, D. K.: The application of the simulated annealing algorithm to the solution of the  $n/m/C_{max}$  flowshop problem. *Computers & Operations Research*, 1990, S. 243–253.
- Ogbu, F. A.; Smith, D. K.: Simulated annealing for the permutation flowshop problem. *Omega*, 1991, S. 64–67.
- Oliff, M. D.: Expert Systems and Intelligent Manufacturing: Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control. held May 1988 in Charleston, South Carolina, Elsevier, New York, 1988.
- Osman, I. H.; Potts, C. N.: Simulated annealing for permutation flow-shop scheduling. *Omega*, 1989, S. 551–557.

- Page, B.; Böckow, R.; Heymann, A.; Kadler, R.; Liebert, H.: Simulation und moderne Programmiersprachen: Modula-2, C, Ada. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1988.
- Panwalkar, S. S.; Iskander, W.: A survey of scheduling rules. *Operations Research*, 1977, S. 45–61.
- Patig, S.: Flexible Produktionsfeinplanung mit Hilfe von Planungsschritten: Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion. Dissertation, Universität Magdeburg, 2001.
- Patzelt W. J.: Einführung in die Politikwissenschaft., Passau, 1992.
- Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Dissertation, Hannover, 1996.
- Pfohl: Logistiksysteme. Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- Pinedo, M.: Planning and scheduling in manufacturing and services. Springer, New York, 2005.
- Pinedo, M.: Scheduling: Theory, algorithms, and systems. Springer, Berlin, 2014.
- Pinedo, M.: Scheduling: Theory, algorithms, and systems. Springer, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2016.
- Plossl, G. W.: Manufacturing Control. The Last Frontier for Profits. Reston Publishing, Reston, VA, 1973.
- Pruhs, K.; Sgall, J.; Torng, E.: Online Scheduling. In: Leung, J. Y.-T. (Hrsg.): Handbook of scheduling: Algorithms, models, and performance analysis. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2004, 15-1.
- Puente, F.; Kiencke, U.: Ereignisdiskrete Systeme: Modellierung und Steuerung verteilter Systeme. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Berlin, Boston, 2006.
- Quadt, D.: Lot-Sizing and Scheduling for Flexible Flow Lines. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- Quadt, D.; Kuhn, H.: A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures. *European Journal of Operational Research*, 2007, S. 686–698.
- Quandt, D.; Kuhn, H.: A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures. *European Journal of Operational Research* 178, 2007, S. 686–698.
- Raheja, A. S.; Subramaniam, V.: Reactive Recovery of Job Shop Schedules - A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, S. 756–763.
- Rahman, A. A. A.: Approachach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow. Dissertation, Berlin, 2013.
- Rajendran, C.; Holthaus, O.: A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*, 1999, S. 156–170.
- Reeves, C. R.: A genetic algorithm for flowshop sequencing. *Computers and Operations Research*, 1995, S. 5–13.
- Reggelin, T.: Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme. Dissertation, docupoint, Magdeburg, 2011.

- Reggelin, T.; Lang, S.; Schauf, C.: Mesoscopic discrete-rate-based simulation models for production and logistics planning. DOI: 10.1080/17477778.2020.1841575, Journal of Simulation, 2020.
- Reggelin, T.; Tolujew, J.: A mesoscopic approach to modeling and simulation of logistics processes. edited by Jain, S. ; Institute of Electrical and Electronics Engineers -IEEE-: Winter Simulation Conference, WSC 2011. Proceedings : 11-14 December 2011, Phoenix, Arizona S.1508-1518 DOI:10.1109/WSC.2011.6147869
- Reichheld, F. F.; Sasser, E.: Zero Defections: Quality Comes to Services. Harvard Business Review, 1990, S. 105–111.
- Reinhart, G.; Niehues, M.; Batzner, J.; Welter, E.: Werkstattsteuerung mittels Ressourcenkonten.: Hochvariante Produkte mittels bestandsregelndem Verfahren effizient und engpassarm fertigen. wt Werkstattstechnik online 103, 2013, S. 331–335.
- Reinhart, G.; Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störmanagement. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 1995, S. 86–89.
- Reinheimer, S. (Hrsg.): Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- Riane, F.: Scheduling hybrid flow shop: Algorithms and applications. Facultés Universitaires Catholiques de Mons. Facultés Universitaires Catholiques de Mons Belgium, 1998.
- Ribas, I.; Leisten, R.; Framinan, J.M.: Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. Computers & Operations Research, 2010, S. 1439–1454.
- Rickel, J.: Issues in the Design of Scheduling Systems. Elsevier, NY. Expert systems and intelligent manufacturing Systems, 1988, S. 70–89.
- Ripp, S.: Komplexitätsbeherrschung der dispositiven Produktionslogistik durch permanente Synchronisation. Dissertation, 2011.
- Rohde, J.; Meyr, H.; Wagner, M.: Die Supply Chain Planning Matrix. PPS-Management. PPS-Management, 2000, S. 10–15.
- Ropohl, G.: Allgemeine Technologie – eine Systemtheorie der Technik. Universitätsverlag, Karlsruhe, 2009.
- Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2016.
- Ruiz, R.; Şerifoğlu, F. S.; Urlings, T.: Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems. Computers and Operations Research, 2008, S. 1151–1175.
- Ruiz, R.; Vázquez-Rodríguez, J. A.: The hybrid flow shop scheduling problem. European Journal of Operational Research, 2010, S. 1–18.
- Salvador, M. S.: A solution to a special case of flow shop scheduling problems. Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications, 1973, S. 83–91.

- Sargut, G.; McGrath, R. G.: Mit Komplexität leben lernen. Harv. Bus. Manag., 2011.
- Sauer, J.: Multi-Site Scheduling - Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen. Habilitationsschrift, 2002a.
- Sauer, J.: Multi-Site Scheduling. Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen. Habilitationsschrift, 2002b.
- Sawik, T.: Mixed integer programming for scheduling flexible flow lines with limited intermediate buffers. *Mathematical and computer modelling*, 2007, S. 1373–1387.
- Schenk, M.; Tolujew, J.; Reggelin, T.: A Mesoscopic Approach to the Simulation of Logistics Systems. In: Dangelmaier W., Blecken A., Delius R., Klöpfer S. (eds) *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*, IHNS, 2010.
- Schenk, M.; Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- Schenk, M.; Wojanowski, R.: *Vorlesung logistische Netzwerke*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2000.
- Schmidt, G.: *Prozessmanagement: Modelle und Methoden*. Springer Gabler, Berlin, 2012.
- Schmigalla, H.: *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge*. Hanser, München, 1995.
- Schneeweiß, C.: *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Springer, Berlin, 2002.
- Schocke, K.-O.: *Maschinenbelegungsplanung mehrstufiger Fließfertigungen: Vom Modell zum Leitstand für die chemische Industrie*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2000.
- Schoeneberg, K.-P.: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014.
- Scholz-Reiter, B.; Beer, C. de; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J. T.: *Dynamik logistischer Systeme*. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 109–138.
- Schoonhoven, J.; M. Roelands; F. Brenna: *Nach dem Hype: Was Führungskräfte über die erfolgreiche Implementierung künstlicher Intelligenz wissen müssen*. IBM Services Whitepaper, 2019.
- Schuberthan, J.; Potrafke, S.: *Die Anforderungen des Kunden*. In: Gehr, F.; Hellingrath, B. (Hrsg.): *Logistik in der Automobilindustrie: Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 8–11.
- Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte*. Springer, Dordrecht, 2007.
- Schuh, G.: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

- Schuh, G.; Fuß, C. (Hrsg.): ProSense: Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes ; hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik. Apprimus Verl., Aachen, 2015.
- Schuh, G.; Potente, T.; Hauptvogel, A.: Methodology for the evaluation of forecast reliability of production planning systems. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2014a, S. 474–479.
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: Cyber-Physical Production Management. In: Prabhu, V.; Taisch, M.; Kiritsis, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems.: Sustainable Production and Service Supply Chains. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Berlin, 2013, S. 477–484.
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. t.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014b, S. 277–295.
- Schuh, G.; Schmidt, C.: Effiziente Informationslogistik im Maschinenbau. wt-online, 2007, S. 272–278.
- Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012a.
- Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 2: Evolution der PPS. Springer, Berlin, 2012b.
- Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Komplexität und Agilität: Steckt die Produktion in der Sackgasse? Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997.
- Seelmann-Eggebert, R; M. Wahl: SCM-Produktportfolio. It and Production, 2001.
- Serifoğlu, F. S.; Ulusoy, G.: Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: a genetic algorithm approach. Journal of the Operational Research Society, 2004, S. 504–512.
- Sesink, W.: Menschliche und künstliche Intelligenz. *Der kleine Unterschied*, Stuttgart, 1993.
- Sgall, J.: On-line Scheduling. Lecture Notes in Computer Science 1442. In: Fiat, A.; Woeginger, G. J. (Hrsg.): Online Algorithms: The State of the Art. Springer, Berlin, 1998, S. 196–231.
- Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement. Dissertation, München, 1994.
- Sonnenschein, K.: Feinplanung in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Aachen, 1998.
- Spearman, M. L.; Woodruff, D. L.; Hopp, W. J.: CONWIP: a pullalternative to kanban. International Journal of Production Research 28, 1990, S. 879–894.
- Staab, J.: Die 7 häufigsten Insolvenzgründe erkennen und vermeiden: Wie KMU nachhaltig erfolgreich bleiben. Springer Gabler, Wiesbaden Germany, 2015.
- Stadtler, H.; Kilger, C.; Meyr, H. (Hrsg.): Supply chain management and advanced planning: Concepts, models, software, and case studies. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2015.

- STEELE, P. B. C. J. R. S.: ALGORITHMS FOR DATA SCIENCE. Springer, 2019.
- Strack, M.: Organisatorische Gestaltung einer zentralen Werkstattsteuerung. Dissertation, Aachen, 1986.
- Straube, F.; Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Trends und Strategien in der Logistik: Globale Netzwerke im Wandel ; Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen. DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl., Hamburg, 2008.
- Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Springer Gabler, Berlin, 2013.
- Sussmann, J.: Ideas on Complexity in Systems – Twenty Views. Working Paper Series. MIT Engineering Systems Division, 2000.
- Tabriz, A. A.; Zandieh, M.; Vaziri, Z.: A Novel Simulated Annealing Algorithm to Hybrid Flow Shops Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times. Journal of Applied Sciences, 2009, 9, S. 1943–1949.
- Taillard, E.: Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. European Journal of Operational Research, 1990, S. 65–74.
- Takaku, K.; Yura, K.: Online scheduling aiming to satisfy due date for flexible flow shops. In: JSME International Journal Series C - Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing. JSME International Journal Series C - Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, 2005, S. 21–25.
- TC: THT-Fertigung, <https://www.tectron-worbis.de/produktion/tht-fertigung/>. Stand: 15.09.2020
- Teichner, M.: Analyse der Wirksamkeit ausgewählter Verfahren der Reihenfolgeplanung für die Erreichung ökonomischer Zielstellungen. Dissertation, Rostock, 2010.
- Thiel, K.: MES - integriertes Produktionsmanagement: Leitfaden, Marktübersicht und Anwendungsbeispiele. Hanser, München, 2011.
- Vahrenkamp, R.; Siepermann, C.: Produktionsmanagement.
- van Dyke Parunak, H.: Characterizing the Manufacturing scheduling Problem. Journal of Manufacturing Systems Vol. 10, 1991, 241–259.
- VDI 4499: VDI Richtlinie 4499 Digitale Fabrik - Grundlagen, Beuth, Berlin, 2008.
- VDI-3633: VDI Richtlinie 3633 Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen, Beuth, Berlin, 2008.
- VDI-5600: Manufacturing execution system (MES) - VDI 5600 Part 1. Verein Deutscher Ingenieure, 2007.
- Vieira, G. E.; Herrmann, J. W.; Lin, E.: Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods. Journal of Scheduling, 2003, S. 39–62.



- Vignier, A.; Billaut, J.-C.; Proust, C.: Les problèmes d'ordonnancement de type flow-shop hybride. État de l'art. *RAIRO: Recherche opérationnelle*, 1999, S. 117–183.
- Voss, S.; Witt, A.: Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. *International journal of production economics*, 2007, S. 445–458.
- Walter, A.: *Methodik der empirischen Forschung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 2009.
- Wang, H.: Flexible flow shop scheduling: optimum, heuristics and artificial intelligence solutions. *Expert Systems*, 2005, S. 78–85.
- Wang, H.: Flexible flow shop scheduling: optimum, heuristics and artificial intelligence solutions. *Expert Systems*, 2005, S. 78–85.
- Wardono, B.; Fathi, Y.: A tabu search algorithm for the multi-stage parallel machine problem with limited buffer capacities. *European Journal of Operational Research*, 2004, S. 380–401.
- Warnecke, H.-J. (Hrsg.): *Aufbruch zum Fraktalen Unternehmen: Praxisbeispiele für neues Denken und Handeln*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995.
- Watkins, C.J.; P. Dayan: Q-learning. In.: *Machine Learning*, 1992, S. 279–292.
- Wei, H.; F. Guo; Su Xichao: A Reinforcement Learning Method for a Hybrid Flow-Shop Scheduling Problem. In: *Mathematics, Computer Science, Algorithms*, 2019.
- Weinbrecht, J.: Ein Verfahren zur zielgerichteten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattfertigung. *Dissertation*, Karlsruhe, 1993.
- Weller, R.: *Verfahren zum kurzfristigen Störfallmanagement für die flexible Werkstattsteuerung*. Dissertation, Stuttgart, 2002.
- Wenzel, S.: *Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge*. Verl. Praxiswissen, Dortmund, 1998.
- Wenzel S.: *Modellbildung in der ereignisdiskreten Simulation*. ASIM Nachrichten. Arbeitsgemeinschaft Simulation - ASIM, 2002, S. 10–15.
- Westkämper, E.; Bauernhansl, T.: *Produktionssteuerung*. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): *Enterprise - Integration*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, S. 13–22.
- Westkämper, E.; Löffler, C.: *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- Westkämper, E.; E. Zahn: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- Wiendahl, H.-H.: *Stolpersteine der PPS - ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement*. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 276–303.

- Wiendahl, H.-H.; Cieminski, G. v.; Wiendahl, H.-P.: Stumbling blocks of PPC: Towards the holistic configuration of PPC systems, *Production Planning & Control* 16, 2005, S. 634–651.
- Wiendahl, H.-P.: Von der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) zur Belastungsorientierten Fertigungssteuerung (BOS-F). In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung BOS-F. gfmt - Gesellschaft für Management und Technologie*, Hannover, 1987, S. 1–40.
- Wiendahl, H.-P.: Produktionsplanung und –steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management »Betriebshütte«*. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. Hanser, München, 1997.
- Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Hanser, München, 2010.
- Wiendahl, H.-P.; Pritschow, G.; Milberg, J.: Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen Teil 2. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 1993, S. 352–354.
- Wiendahl H.-P.; T. Harms: Maßgeschneiderte Fabriken im Dienste des Kunden. In: *Tagungsband 3. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung „Fabrik 2005 + Agilität und Produktivität im Fokus“*. Stuttgart, 2001.
- Wild, J.: *Grundlagen der Unternehmungsplanung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, s.l., 1980.
- Wildemann, H.: *Komplexitätsmanagement: In Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion*. TCW Transfer-Centrum Verl., München, 2014.
- Wu, H.; Li, R.: A new rescheduling method for computer based scheduling systems. *International Journal of Production Research* 33, 1995, S. 2097–2110.
- Yang, T.; Kuo, Y.; Chang, I.: Tabu-search simulation optimization approach for flow-shop scheduling with multiple processors - A case study. *International Journal of Production Research*, 2004, S. 4015–4030.
- Youssef, H.; M. Sait, S.; Adiche, H.: Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2001, S. 167–181.
- Zacharias, M.; A. Tonnius; J. Gottschling: Machine Learning in Hybrid Flow Shop Scheduling with Unrelated Machines. In: *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, 2019.
- Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Ostgathe, M.; Geiger, F.; Lau, C.: A holistic approach for the cognitive control of production systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2010, S. 300–307.
- Zäpfel, G.: *Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement*. de Gruyter, Berlin, 1996.
- Zetlmayer, H.: *Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion*. iwv-Forschungsberichte, 1993.

Zimmermann, H.-J.: Operations Research: Methoden und Modelle; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker. Vieweg, Wiesbaden, 2008.

Zuboff, S.: In the age of the smart machine: The future of work and power. Basic Books, New York, 1988.

ZVEI-A: EMS: Dienstleistungen backstage – Mehrwert unter dem Radar., [www.zvei.org](http://www.zvei.org). Stand: 15.03.2020

ZVEI-B: Die deutsche Elektroindustrie – Daten, Zahlen und Fakten, [www.zvei.org](http://www.zvei.org). Stand: 13.12.2019

# Anhang A

## A1: Szenario 1 (MAX)

Tabelle A.1: Zusammenfassung der Zielwerte MISO und EDD von Szenario 1 (MAX)  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO					EDD				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	17.807	4	255	49	8.330	19.685	1	121	132	8.322
2	14.380	5	426	41	7.610	16.339	1	790	134	7.643
3	16.735	3	471	48	7.948	18.766	0	0	127	8.138
4	18.432	4	163	47	8.288	19.890	0	0	130	9.242
5	16.785	6	391	44	7.460	18.694	1	49	121	8.064
6	18.904	5	309	47	8.426	20.182	3	201	127	8.568
7	16.620	3	157	43	7.407	17.602	0	0	129	8.113
8	17.575	4	484	43	7.499	18.124	0	0	135	8.065
9	16.425	2	177	48	6.914	16.703	0	0	134	7.561
10	14.708	2	103	40	7.066	16.876	0	0	132	7.053
11	18.279	4	475	47	8.415	19.546	1	1.499	134	8.485
12	16.116	4	498	40	7.118	17.596	0	0	129	6.896
13	12.941	2	443	38	6.100	15.438	0	0	133	6.290
14	16.026	2	408	43	7.208	17.899	0	0	128	7.271
15	15.480	0	0	40	7.022	16.224	0	0	134	7.248
16	15.478	4	146	43	6.754	16.699	0	0	139	7.054
17	16.359	4	472	41	7.691	18.817	0	0	135	7.672
18	16.584	2	417	47	7.392	17.994	0	0	128	7.682
19	17.132	3	472	43	7.690	19.371	0	0	132	8.479
20	16.821	5	100	44	7.461	18.147	0	0	135	7.430
21	17.472	2	127	45	7.634	19.500	0	0	126	8.239
22	16.579	5	361	42	7.353	17.698	1	407	138	7.461
23	17.367	2	120	44	7.409	18.450	0	0	127	8.162
24	15.479	2	428	43	7.138	17.536	0	0	138	7.674
25	15.911	6	370	47	7.308	17.104	1	404	142	7.735
26	17.305	2	539	44	8.242	18.210	0	0	125	8.682
27	18.568	3	471	44	8.440	19.031	0	0	137	9.000
28	17.550	5	286	45	7.739	20.314	0	0	140	7.750
29	17.232	3	368	41	8.243	19.545	1	115	131	8.579
30	17.319	1	197	36	7.403	19.378	0	0	130	7.436
$\emptyset$	<b>16.679</b>	<b>3</b>	<b>321</b>	<b>44</b>	<b>7.557</b>	<b>18.245</b>	<b>0</b>	<b>120</b>	<b>132</b>	<b>7.866</b>

Tabelle: A.2 Zusammenfassung der Zielwerte SPT und FP von Szenario 1 (MAX)  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	SPT					FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	20.365	21	4.582	141	5.717	18.940	40	4.386	35	8.324
2	16.579	16	4.099	137	4.934	14.960	28	3.683	32	7.110
3	19.358	25	3.853	141	5.490	18.008	40	3.479	35	7.879
4	19.997	31	3.727	133	6.317	18.913	48	4.237	35	9.303
5	18.274	20	2.598	131	5.390	17.427	34	4.457	34	8.481
6	19.992	22	4.754	136	5.926	18.325	42	4.409	33	8.619
7	18.042	20	3.521	139	5.526	16.850	27	4.191	33	7.749
8	18.049	24	2.987	134	5.682	16.067	31	4.753	35	7.872
9	16.713	15	3.536	139	5.332	15.530	31	3.423	35	8.001
10	16.816	17	2.357	137	4.655	14.820	27	2.993	34	7.146
11	19.222	26	3.838	136	5.926	17.617	36	4.442	35	8.842
12	18.149	11	4.530	136	5.249	16.896	35	3.705	32	7.526
13	15.798	10	1.502	136	4.116	15.065	25	3.739	34	6.168
14	16.691	19	3.275	137	5.049	16.235	28	3.711	35	7.282
15	15.856	15	3.593	134	4.907	15.284	25	3.968	35	7.270
16	17.080	15	2.859	137	4.826	15.169	23	3.165	33	6.606
17	19.062	13	4.674	137	5.165	16.529	25	3.216	35	7.736
18	17.076	17	3.345	144	5.144	15.977	31	3.533	33	7.815
19	20.070	19	3.216	137	5.820	17.535	36	4.581	35	8.859
20	17.618	17	2.898	144	5.016	16.459	35	3.451	35	7.539
21	20.108	24	3.430	144	5.778	18.600	36	3.944	33	8.585
22	17.305	16	3.493	141	5.134	15.748	22	3.997	34	7.719
23	19.256	18	3.320	133	5.485	17.172	31	4.985	35	8.382
24	17.067	16	3.121	134	5.078	15.034	25	4.237	35	7.856
25	17.164	18	3.546	137	5.253	16.433	36	3.107	34	7.643
26	18.624	25	3.093	136	6.058	17.241	35	5.120	35	9.223
27	19.525	18	3.051	138	6.449	17.628	31	5.359	35	9.070
28	20.460	17	3.566	138	5.669	19.452	34	4.447	35	8.347
29	19.785	19	2.827	133	5.834	17.831	29	4.883	34	8.232
30	19.820	16	2.975	134	5.331	18.291	31	4.443	34	7.813
$\emptyset$	<b>18.331</b>	<b>19</b>	<b>3.406</b>	<b>137</b>	<b>5.409</b>	<b>16.868</b>	<b>32</b>	<b>4.068</b>	<b>34</b>	<b>7.967</b>

Tabelle A.3: Gewichtung der Zielwerte von Szenario 1 (MAX)  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO				EDD				SPT				FP			
	<i>C<sub>max</sub></i>	<i>U</i>	$\bar{T}$	<i>MS<sub>1</sub></i>	<i>C<sub>max</sub></i>	<i>U</i>	$\bar{T}$	<i>MS<sub>1</sub></i>	<i>C<sub>max</sub></i>	<i>U</i>	$\bar{T}$	<i>MS<sub>1</sub></i>	<i>C<sub>max</sub></i>	<i>U</i>	$\bar{T}$	<i>MS<sub>1</sub></i>
1	0,00	0,08	0,03	0,13	0,73	0,00	0,00	0,92	1,00	0,51	1,00	1,00	0,44	1,00	0,96	0,00
2	0,00	0,15	0,00	0,09	0,89	0,00	0,10	0,97	1,00	0,56	1,00	1,00	0,26	1,00	0,89	0,00
3	0,00	0,08	0,12	0,12	0,77	0,00	0,00	0,87	1,00	0,63	1,00	1,00	0,49	1,00	0,90	0,00
4	0,00	0,08	0,04	0,12	0,93	0,00	0,00	0,97	1,00	0,65	0,88	1,00	0,31	1,00	1,00	0,00
5	0,00	0,15	0,08	0,10	1,00	0,00	0,00	0,90	0,78	0,58	0,58	1,00	0,34	1,00	1,00	0,00
6	0,31	0,05	0,02	0,14	1,00	0,00	0,00	0,91	0,90	0,49	1,00	1,00	0,00	1,00	0,92	0,00
7	0,00	0,11	0,04	0,09	0,69	0,00	0,00	0,91	1,00	0,74	0,84	1,00	0,16	1,00	1,00	0,00
8	0,73	0,13	0,10	0,08	1,00	0,00	0,00	1,00	0,96	0,77	0,63	0,99	0,00	1,00	1,00	0,00
9	0,76	0,06	0,05	0,13	0,99	0,00	0,00	0,95	1,00	0,48	1,00	1,00	0,00	1,00	0,97	0,00
10	0,00	0,07	0,03	0,06	1,00	0,00	0,00	0,95	0,97	0,63	0,79	1,00	0,05	1,00	1,00	0,00
11	0,34	0,09	0,00	0,12	1,00	0,00	0,26	0,98	0,83	0,71	0,85	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
12	0,00	0,11	0,11	0,08	0,73	0,00	0,00	0,93	1,00	0,31	1,00	1,00	0,38	1,00	0,82	0,00
13	0,00	0,08	0,12	0,04	0,87	0,00	0,00	0,97	1,00	0,40	0,40	1,00	0,74	1,00	1,00	0,00
14	0,00	0,07	0,11	0,08	1,00	0,00	0,00	0,91	0,36	0,68	0,88	1,00	0,11	1,00	1,00	0,00
15	0,21	0,00	0,00	0,05	1,00	0,00	0,00	1,00	0,61	0,60	0,91	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
16	0,16	0,17	0,05	0,09	0,80	0,00	0,00	1,00	1,00	0,65	0,90	0,98	0,00	1,00	1,00	0,00
17	0,00	0,16	0,10	0,06	0,91	0,00	0,00	0,98	1,00	0,52	1,00	1,00	0,06	1,00	0,69	0,00
18	0,30	0,06	0,12	0,13	1,00	0,00	0,00	0,86	0,54	0,55	0,95	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
19	0,00	0,08	0,10	0,08	0,76	0,00	0,00	0,95	1,00	0,53	0,70	1,00	0,14	1,00	1,00	0,00
20	0,21	0,14	0,03	0,08	1,00	0,00	0,00	0,92	0,69	0,49	0,84	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
21	0,00	0,06	0,03	0,11	0,77	0,00	0,00	0,84	1,00	0,67	0,87	1,00	0,43	1,00	1,00	0,00
22	0,43	0,19	0,00	0,07	1,00	0,00	0,01	0,97	0,80	0,71	0,86	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
23	0,09	0,06	0,02	0,09	0,61	0,00	0,00	0,94	1,00	0,58	0,67	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
24	0,18	0,08	0,10	0,08	1,00	0,00	0,00	1,00	0,81	0,64	0,74	0,96	0,00	1,00	1,00	0,00
25	0,00	0,14	0,00	0,12	0,95	0,00	0,01	1,00	1,00	0,49	1,00	0,95	0,42	1,00	0,86	0,00
26	0,05	0,06	0,11	0,09	0,70	0,00	0,00	0,89	1,00	0,71	0,60	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
27	0,50	0,10	0,09	0,09	0,74	0,00	0,00	0,99	1,00	0,58	0,57	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
28	0,00	0,15	0,06	0,10	0,95	0,00	0,00	1,00	1,00	0,50	0,80	0,98	0,65	1,00	1,00	0,00
29	0,00	0,07	0,05	0,07	0,91	0,00	0,00	0,98	1,00	0,64	0,57	1,00	0,23	1,00	1,00	0,00
30	0,00	0,03	0,04	0,02	0,82	0,00	0,00	0,96	1,00	0,52	0,67	1,00	0,39	1,00	1,00	0,00
$\emptyset$	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>	<b>0,88</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,58</b>	<b>0,82</b>	<b>1,00</b>	<b>0,19</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	<b>0,00</b>

Tabelle A.4: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung von Szenario 1 (MAX)  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

	gleichverteilt				kapazitätsorientiert				liefertreueorientiert				streng liefertreueorientiert			
$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,06	0,41	0,88	0,60	0,06	0,66	0,95	0,37	0,06	0,16	0,81	0,83	0,05	0,08	0,78	0,90
2	0,06	0,49	0,89	0,54	0,05	0,75	0,96	0,29	0,07	0,23	0,82	0,78	0,07	0,14	0,80	0,86
3	0,08	0,41	0,91	0,60	0,07	0,66	0,96	0,38	0,09	0,16	0,85	0,81	0,09	0,08	0,83	0,88
4	0,06	0,48	0,88	0,58	0,06	0,76	0,95	0,32	0,06	0,19	0,81	0,83	0,06	0,10	0,79	0,92
5	0,08	0,47	0,73	0,58	0,06	0,76	0,83	0,33	0,10	0,19	0,64	0,83	0,11	0,09	0,61	0,92
6	0,13	0,48	0,85	0,48	0,19	0,77	0,91	0,19	0,07	0,19	0,78	0,77	0,06	0,10	0,76	0,87
7	0,06	0,40	0,90	0,54	0,05	0,64	0,96	0,26	0,07	0,16	0,83	0,82	0,07	0,08	0,81	0,91
8	0,26	0,50	0,84	0,50	0,35	0,80	0,92	0,20	0,17	0,20	0,76	0,80	0,14	0,10	0,73	0,90
9	0,25	0,49	0,87	0,49	0,36	0,78	0,95	0,20	0,13	0,19	0,79	0,79	0,10	0,10	0,77	0,89
10	0,04	0,49	0,85	0,51	0,03	0,78	0,93	0,22	0,05	0,20	0,76	0,81	0,05	0,10	0,74	0,90
11	0,14	0,56	0,85	0,50	0,19	0,82	0,89	0,20	0,08	0,30	0,81	0,80	0,06	0,22	0,79	0,90
12	0,08	0,42	0,83	0,55	0,05	0,66	0,93	0,34	0,10	0,17	0,73	0,77	0,10	0,08	0,69	0,84
13	0,06	0,46	0,70	0,69	0,04	0,74	0,88	0,50	0,08	0,18	0,52	0,87	0,09	0,09	0,46	0,94
14	0,06	0,48	0,73	0,53	0,05	0,76	0,70	0,24	0,08	0,19	0,76	0,81	0,09	0,10	0,77	0,91
15	0,06	0,50	0,78	0,50	0,10	0,80	0,79	0,20	0,03	0,20	0,76	0,80	0,01	0,10	0,76	0,90
16	0,12	0,45	0,88	0,50	0,12	0,72	0,95	0,20	0,11	0,18	0,82	0,80	0,11	0,09	0,80	0,90
17	0,08	0,47	0,88	0,44	0,05	0,76	0,95	0,19	0,11	0,19	0,81	0,68	0,12	0,09	0,78	0,76
18	0,15	0,46	0,76	0,50	0,19	0,74	0,77	0,20	0,12	0,19	0,75	0,80	0,10	0,09	0,75	0,90
19	0,07	0,43	0,81	0,53	0,05	0,69	0,92	0,25	0,08	0,17	0,69	0,81	0,09	0,09	0,65	0,91
20	0,12	0,48	0,75	0,50	0,14	0,77	0,81	0,20	0,10	0,19	0,70	0,80	0,09	0,10	0,68	0,90
21	0,05	0,40	0,88	0,61	0,05	0,64	0,95	0,37	0,05	0,16	0,81	0,84	0,04	0,08	0,79	0,92
22	0,17	0,50	0,84	0,50	0,22	0,79	0,88	0,20	0,13	0,20	0,81	0,80	0,11	0,10	0,80	0,90
23	0,07	0,39	0,81	0,50	0,08	0,62	0,92	0,20	0,05	0,16	0,70	0,80	0,05	0,08	0,66	0,90
24	0,11	0,50	0,79	0,50	0,12	0,80	0,85	0,20	0,10	0,20	0,73	0,80	0,09	0,10	0,71	0,90
25	0,07	0,49	0,86	0,57	0,06	0,78	0,93	0,35	0,07	0,20	0,79	0,79	0,07	0,10	0,77	0,86
26	0,07	0,40	0,83	0,50	0,07	0,64	0,93	0,20	0,08	0,16	0,73	0,80	0,08	0,08	0,69	0,90
27	0,19	0,43	0,79	0,50	0,25	0,69	0,91	0,20	0,13	0,17	0,66	0,80	0,11	0,09	0,62	0,90
28	0,08	0,49	0,82	0,66	0,06	0,78	0,92	0,46	0,09	0,19	0,72	0,87	0,10	0,10	0,68	0,93
29	0,05	0,47	0,80	0,56	0,04	0,75	0,92	0,29	0,06	0,19	0,68	0,82	0,06	0,09	0,65	0,91
30	0,02	0,45	0,80	0,60	0,02	0,71	0,92	0,36	0,03	0,18	0,67	0,84	0,04	0,09	0,63	0,92
$\emptyset$	<b>0,10</b>	<b>0,46</b>	<b>0,83</b>	<b>0,54</b>	<b>0,11</b>	<b>0,73</b>	<b>0,90</b>	<b>0,27</b>	<b>0,09</b>	<b>0,19</b>	<b>0,75</b>	<b>0,81</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,73</b>	<b>0,89</b>

## A2: Szenario 2

Tabelle A.5: Zusammenfassung der Zielwerte MISO und EDD von Szenario 2  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO					EDD				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	18.917	1	876	39	8.551	20.099	0	0	136	8.921
2	19.615	2	650	49	8.957	20.577	0	0	126	9.442
3	21.583	2	157	46	9.938	21.985	0	0	133	10.378
4	19.776	3	173	49	9.017	20.274	0	0	136	9.424
5	18.333	4	671	57	8.221	19.351	0	0	132	9.292
6	18.223	4	356	47	8.116	19.428	0	0	133	8.660
7	17.674	2	352	49	8.544	18.186	1	305	131	9.350
8	21.160	4	378	56	9.820	21.935	0	0	140	10.286
9	18.678	6	551	50	9.000	19.591	2	403	128	9.633
10	17.926	2	587	44	8.910	19.972	0	0	128	9.248
11	19.970	2	649	54	9.050	20.979	0	0	132	10.203
12	18.283	2	109	50	8.508	19.992	0	0	136	9.710
13	22.682	3	322	50	10.426	23.219	0	0	137	10.929
14	22.220	3	312	56	10.100	23.055	0	0	133	11.268
15	19.824	3	200	49	8.888	20.624	0	0	135	9.912
16	20.710	1	653	53	9.820	22.263	0	0	132	10.538
17	20.979	3	291	52	9.644	21.727	0	0	132	10.027
18	16.958	2	462	45	8.235	17.903	0	0	137	8.777
19	18.996	2	121	47	7.938	20.016	0	0	130	9.147
20	19.366	2	153	48	8.106	20.019	0	0	136	8.936
21	18.740	2	345	55	9.526	20.321	1	564	124	9.949
22	18.006	3	153	50	8.159	19.293	0	0	137	9.074
23	18.269	2	714	43	8.507	20.114	0	0	135	9.112
24	19.425	4	246	51	8.680	19.877	0	0	132	9.111
25	22.507	2	595	54	10.537	23.127	0	0	138	11.153
26	18.650	5	461	43	8.231	19.310	0	0	132	8.948
27	21.133	6	333	48	9.569	23.081	0	0	135	10.287
28	18.363	4	324	52	9.472	20.093	1	354	141	9.907
29	19.377	2	259	45	8.167	19.258	0	0	135	9.097
30	19.667	1	78	43	8.383	19.991	0	0	139	8.924
<b>∅</b>	<b>19.534</b>	<b>3</b>	<b>384</b>	<b>49</b>	<b>8.967</b>	<b>20.522</b>	<b>0</b>	<b>54</b>	<b>134</b>	<b>9.655</b>



Tabelle A.6: Zusammenfassung der Zielwerte SPT und FP von Szenario 2  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	SPT					FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	20.189	20	2.874	143	5.965	19.186	28	4.269	36	8.849
2	18.651	24	4.716	139	5.849	17.192	37	4.919	36	8.974
3	21.475	25	4.763	135	6.423	22.545	47	5.218	36	10.135
4	21.761	26	3.026	142	6.457	19.538	46	4.124	36	9.537
5	18.803	23	4.517	146	6.040	17.642	38	4.348	35	8.265
6	19.509	18	3.404	139	5.346	17.254	32	4.025	36	8.740
7	19.197	26	3.731	143	5.684	17.823	36	4.728	35	8.684
8	22.290	24	5.516	137	6.539	20.047	48	6.536	36	10.712
9	20.452	27	4.724	149	6.490	18.897	49	4.808	35	9.219
10	20.094	17	3.136	146	6.236	19.325	36	4.950	34	9.078
11	20.458	31	3.828	140	6.411	18.949	41	4.708	36	9.399
12	20.082	26	4.209	136	6.061	18.908	39	4.829	36	9.409
13	23.655	27	5.899	145	7.656	21.579	47	5.501	35	11.198
14	24.211	30	5.232	136	7.604	21.771	57	4.844	35	11.763
15	21.080	32	3.141	142	6.756	19.733	49	4.607	35	10.015
16	22.200	26	4.334	137	6.765	20.368	47	5.462	36	9.933
17	20.906	28	4.178	144	6.604	20.536	47	4.791	36	10.471
18	18.224	18	4.126	143	5.771	17.624	34	5.442	36	8.733
19	20.589	31	3.211	135	6.334	19.444	47	5.250	36	9.337
20	18.908	21	4.501	139	5.759	18.356	39	5.156	36	9.148
21	20.237	31	4.859	136	6.440	18.818	41	5.325	35	9.442
22	18.125	26	4.328	146	5.842	17.023	42	4.468	35	8.133
23	18.949	19	3.858	142	6.150	17.784	33	5.000	35	9.576
24	20.449	25	4.040	137	6.195	19.644	44	4.461	36	9.172
25	22.888	30	6.463	145	7.738	21.358	53	5.497	36	11.234
26	18.901	22	3.966	141	5.809	17.685	38	5.147	35	8.757
27	22.268	24	4.709	130	6.637	21.702	41	5.193	34	9.509
28	20.277	24	6.038	135	6.369	19.719	38	5.473	35	9.506
29	20.091	29	2.962	145	6.201	19.258	44	4.773	36	10.302
30	20.714	20	3.425	140	6.319	18.986	34	4.252	33	9.764
$\emptyset$	<b>20.521</b>	<b>25</b>	<b>4.257</b>	<b>140</b>	<b>6.348</b>	<b>19.290</b>	<b>42</b>	<b>4.937</b>	<b>35</b>	<b>9.566</b>

Tabelle A.7: Gewichtung der Zielwerte von Szenario 2 (Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO				EDD				SPT				FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1		0,00	0,04	0,21	0,03	0,93	0,00	0,00	0,93	1,00	0,71	0,67	1,00	0,21	1,00	1,00	0,00
2		0,72	0,05	0,13	0,13	1,00	0,00	0,00	0,87	0,43	0,65	0,96	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
3		0,10	0,04	0,03	0,10	0,48	0,00	0,00	0,98	0,00	0,53	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
4		0,11	0,07	0,04	0,12	0,33	0,00	0,00	0,94	1,00	0,57	0,73	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5		0,40	0,11	0,15	0,20	1,00	0,00	0,00	0,87	0,68	0,61	1,00	1,00	0,00	1,00	0,96	0,00
6		0,43	0,13	0,09	0,11	0,96	0,00	0,00	0,94	1,00	0,56	0,85	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
7		0,00	0,03	0,01	0,13	0,34	0,00	0,00	0,89	1,00	0,71	0,77	1,00	0,10	1,00	1,00	0,00
8		0,50	0,08	0,06	0,19	0,84	0,00	0,00	1,00	1,00	0,50	0,84	0,97	0,00	1,00	1,00	0,00
9		0,00	0,09	0,03	0,13	0,51	0,00	0,00	0,82	1,00	0,53	0,98	1,00	0,12	1,00	1,00	0,00
10		0,00	0,06	0,12	0,09	0,94	0,00	0,00	0,84	1,00	0,47	0,63	1,00	0,65	1,00	1,00	0,00
11		0,50	0,05	0,14	0,17	1,00	0,00	0,00	0,92	0,74	0,76	0,81	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
12		0,00	0,05	0,02	0,14	0,95	0,00	0,00	1,00	1,00	0,67	0,87	1,00	0,35	1,00	1,00	0,00
13		0,53	0,06	0,05	0,14	0,79	0,00	0,00	0,93	1,00	0,57	1,00	1,00	0,00	1,00	0,93	0,00
14		0,18	0,05	0,06	0,21	0,53	0,00	0,00	0,97	1,00	0,53	1,00	1,00	0,00	1,00	0,93	0,00
15		0,07	0,06	0,04	0,13	0,66	0,00	0,00	0,93	1,00	0,65	0,68	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
16		0,18	0,02	0,12	0,17	1,00	0,00	0,00	0,95	0,97	0,55	0,79	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
17		0,37	0,06	0,06	0,15	1,00	0,00	0,00	0,89	0,31	0,60	0,87	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
18		0,00	0,06	0,08	0,08	0,75	0,00	0,00	0,94	1,00	0,53	0,76	1,00	0,53	1,00	1,00	0,00
19		0,00	0,04	0,02	0,11	0,64	0,00	0,00	0,95	1,00	0,66	0,61	1,00	0,28	1,00	1,00	0,00
20		0,61	0,05	0,03	0,12	1,00	0,00	0,00	0,97	0,33	0,54	0,87	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
21		0,00	0,03	0,00	0,20	1,00	0,00	0,04	0,88	0,95	0,75	0,91	1,00	0,05	1,00	1,00	0,00
22		0,43	0,07	0,03	0,14	1,00	0,00	0,00	0,92	0,49	0,62	0,97	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
23		0,21	0,06	0,14	0,07	1,00	0,00	0,00	0,93	0,50	0,58	0,77	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
24		0,00	0,09	0,06	0,15	0,44	0,00	0,00	0,95	1,00	0,57	0,91	1,00	0,21	1,00	1,00	0,00
25		0,65	0,04	0,09	0,17	1,00	0,00	0,00	0,94	0,86	0,57	1,00	1,00	0,00	1,00	0,85	0,00
26		0,59	0,13	0,09	0,08	1,00	0,00	0,00	0,92	0,75	0,58	0,77	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
27		0,00	0,15	0,06	0,14	1,00	0,00	0,00	1,00	0,58	0,59	0,91	0,95	0,29	1,00	1,00	0,00
28		0,00	0,08	0,00	0,16	0,90	0,00	0,01	1,00	1,00	0,62	1,00	0,94	0,71	1,00	0,90	0,00
29		0,14	0,05	0,05	0,08	0,00	0,00	0,00	0,91	1,00	0,66	0,62	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
30		0,39	0,03	0,02	0,09	0,58	0,00	0,00	0,99	1,00	0,59	0,81	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
∅		<b>0,24</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,13</b>	<b>0,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,82</b>	<b>0,60</b>	<b>0,84</b>	<b>1,00</b>	<b>0,15</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,00</b>

Tabelle A.8: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung von Szenario 2  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

	gleichverteilt				kapazitätsorientiert				liefertreueorientiert				streng liefertreueorientiert			
$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,07	0,47	0,85	0,55	0,04	0,75	0,94	0,28	0,10	0,19	0,76	0,82	0,11	0,09	0,72	0,91
2	0,26	0,47	0,76	0,50	0,36	0,75	0,73	0,20	0,16	0,19	0,79	0,80	0,13	0,09	0,79	0,90
3	0,07	0,36	0,61	0,75	0,09	0,58	0,54	0,60	0,05	0,15	0,68	0,90	0,04	0,07	0,70	0,95
4	0,08	0,32	0,82	0,50	0,10	0,51	0,93	0,20	0,07	0,13	0,72	0,80	0,06	0,06	0,68	0,90
5	0,21	0,47	0,82	0,49	0,27	0,75	0,83	0,20	0,16	0,19	0,81	0,79	0,14	0,09	0,81	0,88
6	0,19	0,48	0,85	0,50	0,24	0,76	0,94	0,20	0,14	0,19	0,76	0,80	0,12	0,10	0,73	0,90
7	0,04	0,31	0,87	0,52	0,06	0,49	0,95	0,24	0,03	0,12	0,80	0,81	0,02	0,06	0,77	0,90
8	0,21	0,46	0,83	0,50	0,29	0,74	0,92	0,20	0,13	0,18	0,73	0,80	0,10	0,09	0,70	0,90
9	0,06	0,33	0,88	0,53	0,06	0,53	0,95	0,25	0,06	0,13	0,81	0,81	0,06	0,07	0,78	0,91
10	0,07	0,45	0,78	0,66	0,05	0,71	0,91	0,46	0,08	0,18	0,64	0,86	0,08	0,09	0,60	0,93
11	0,22	0,48	0,83	0,50	0,29	0,77	0,85	0,20	0,14	0,19	0,80	0,80	0,12	0,10	0,79	0,90
12	0,05	0,49	0,88	0,59	0,06	0,78	0,95	0,34	0,04	0,19	0,82	0,83	0,04	0,10	0,79	0,92
13	0,20	0,43	0,89	0,48	0,28	0,69	0,96	0,19	0,11	0,17	0,83	0,77	0,09	0,09	0,81	0,87
14	0,13	0,37	0,88	0,48	0,17	0,60	0,95	0,19	0,08	0,15	0,81	0,77	0,07	0,07	0,79	0,87
15	0,08	0,40	0,83	0,50	0,09	0,64	0,93	0,20	0,06	0,16	0,73	0,80	0,06	0,08	0,70	0,90
16	0,12	0,49	0,83	0,50	0,15	0,78	0,92	0,20	0,09	0,20	0,74	0,80	0,08	0,10	0,70	0,90
17	0,16	0,47	0,69	0,50	0,22	0,76	0,67	0,20	0,10	0,19	0,72	0,80	0,08	0,09	0,73	0,90
18	0,06	0,42	0,82	0,63	0,05	0,68	0,93	0,41	0,07	0,17	0,72	0,85	0,07	0,08	0,68	0,93
19	0,04	0,40	0,82	0,57	0,05	0,64	0,93	0,31	0,04	0,16	0,71	0,83	0,04	0,08	0,67	0,91
20	0,20	0,49	0,69	0,50	0,30	0,79	0,67	0,20	0,10	0,20	0,70	0,80	0,07	0,10	0,70	0,90
21	0,06	0,48	0,90	0,51	0,08	0,76	0,94	0,22	0,03	0,21	0,86	0,80	0,02	0,11	0,84	0,90
22	0,17	0,48	0,77	0,50	0,24	0,77	0,75	0,20	0,10	0,19	0,78	0,80	0,08	0,10	0,79	0,90
23	0,12	0,48	0,71	0,50	0,13	0,77	0,73	0,20	0,11	0,19	0,69	0,80	0,11	0,10	0,68	0,90
24	0,07	0,35	0,87	0,55	0,07	0,56	0,95	0,29	0,07	0,14	0,79	0,82	0,07	0,07	0,76	0,91
25	0,24	0,48	0,86	0,46	0,34	0,77	0,90	0,19	0,13	0,19	0,81	0,74	0,10	0,10	0,80	0,83
26	0,22	0,48	0,77	0,50	0,29	0,77	0,83	0,20	0,16	0,19	0,71	0,80	0,13	0,10	0,69	0,90
27	0,09	0,50	0,76	0,57	0,08	0,80	0,76	0,32	0,10	0,20	0,75	0,83	0,10	0,10	0,75	0,91
28	0,06	0,48	0,89	0,65	0,07	0,76	0,94	0,47	0,05	0,19	0,84	0,83	0,04	0,10	0,83	0,89
29	0,08	0,23	0,82	0,50	0,10	0,36	0,93	0,20	0,06	0,09	0,71	0,80	0,06	0,05	0,68	0,90
30	0,13	0,39	0,85	0,50	0,20	0,63	0,94	0,20	0,07	0,16	0,76	0,80	0,05	0,08	0,73	0,90
$\emptyset$	0,13	0,43	0,81	0,53	0,16	0,69	0,87	0,26	0,09	0,17	0,76	0,81	0,08	0,09	0,74	0,90

**A3: Szenario 3**Tabelle A.9: Zusammenfassung der Zielwerte MISO und EDD von Szenario 3  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO					EDD				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	18.409	5	226	51	8.158	19.482	0	0	145	8.711
2	16.506	3	170	40	7.548	19.511	0	0	139	8.911
3	17.726	2	260	45	8.452	19.211	0	0	136	9.528
4	17.511	3	234	47	7.981	18.841	0	0	136	8.787
5	17.838	4	667	51	8.916	19.129	0	0	133	9.630
6	16.256	3	319	38	7.604	17.849	0	0	145	8.446
7	17.504	1	771	45	8.781	18.697	0	0	131	9.295
8	17.538	7	233	44	8.445	19.536	0	0	135	9.143
9	17.545	0	0	45	9.166	18.725	0	0	129	9.504
10	17.823	3	536	48	8.598	20.833	0	0	140	9.199
11	17.952	5	499	50	8.890	19.539	0	0	136	9.471
12	17.686	5	302	45	7.692	19.345	0	0	137	8.553
13	18.706	4	533	50	8.421	20.667	0	0	144	9.803
14	23.513	7	387	63	10.644	25.047	3	503	140	11.665
15	20.845	1	1.192	53	9.689	22.658	0	0	132	10.604
16	20.585	6	640	43	8.925	22.639	0	0	138	9.535
17	18.028	5	259	46	8.555	19.458	0	0	131	8.777
18	20.274	0	0	48	8.806	20.945	0	0	142	10.098
19	20.072	3	312	54	9.410	22.150	1	967	138	10.448
20	19.424	3	392	54	8.570	20.460	0	0	143	9.661
21	21.923	3	821	64	10.158	23.982	6	354	139	10.859
22	18.499	6	453	52	8.694	19.607	0	0	138	9.581
23	19.039	4	355	41	8.242	20.098	0	0	141	8.994
24	19.615	3	368	49	9.385	21.317	0	0	137	10.553
25	20.027	3	530	49	8.572	20.365	0	0	137	9.730
26	17.881	1	142	49	7.544	18.332	0	0	141	8.989
27	18.846	5	342	55	9.173	20.007	0	0	140	9.729
28	20.404	6	314	59	9.860	22.898	0	0	138	10.636
29	18.095	3	650	46	8.869	19.777	0	0	137	9.455
30	20.954	3	435	57	9.637	22.353	1	127	139	10.829
$\emptyset$	<b>18.901</b>	<b>4</b>	<b>411</b>	<b>49</b>	<b>8.780</b>	<b>20.449</b>	<b>0</b>	<b>65</b>	<b>138</b>	<b>9.637</b>

Tabelle A.10: Zusammenfassung der Zielwerte SPT und FP von Szenario 3  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	SPT					FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	19.646	20	3.798	148	6.427	18.579	39	3.960	37	8.952
2	18.650	20	3.260	149	5.861	16.903	34	4.877	35	8.506
3	20.320	22	4.626	141	6.217	17.856	37	4.184	35	8.840
4	18.690	18	3.769	143	5.940	17.364	37	4.503	37	8.664
5	18.868	28	3.464	143	5.940	17.527	44	4.130	36	9.424
6	18.165	17	2.626	140	5.716	16.806	38	4.298	37	8.338
7	18.831	24	3.453	144	6.101	17.526	36	3.711	37	8.788
8	18.980	20	3.286	147	5.989	17.841	33	3.883	34	8.563
9	18.232	21	4.138	147	6.039	17.533	35	5.172	37	9.207
10	21.097	24	3.464	150	5.823	18.392	43	4.252	36	8.945
11	20.123	24	3.179	143	6.196	17.192	32	4.519	37	8.956
12	19.985	14	4.510	142	5.530	18.954	37	4.168	36	8.369
13	20.640	20	3.896	143	5.792	18.241	42	4.915	37	9.910
14	24.682	25	5.267	138	7.289	23.324	56	4.920	36	11.329
15	22.366	28	3.684	147	7.025	21.655	50	4.771	37	11.124
16	22.865	22	3.576	146	6.352	20.302	44	4.918	37	9.914
17	20.041	18	3.289	141	5.732	18.160	28	4.019	36	8.070
18	21.181	20	4.891	148	6.482	19.489	38	5.060	36	9.896
19	22.285	24	5.376	151	6.881	19.531	46	4.712	36	9.726
20	20.632	25	2.630	145	6.058	19.057	40	4.534	37	9.175
21	22.881	30	4.876	144	7.042	21.212	55	6.550	37	11.134
22	19.571	24	4.532	146	6.067	18.437	48	4.838	36	9.759
23	20.338	23	2.980	145	6.159	18.204	37	4.912	36	9.123
24	21.710	23	4.710	142	6.510	19.956	32	5.038	34	9.776
25	21.218	21	3.794	141	6.648	20.466	45	4.777	37	9.951
26	19.072	18	3.683	153	5.541	16.974	33	4.950	37	8.761
27	20.258	25	4.683	149	6.585	19.566	52	6.142	37	10.502
28	22.886	28	4.173	145	7.025	21.639	47	5.883	36	10.313
29	20.055	21	3.543	149	6.213	18.082	35	5.680	37	9.321
30	22.556	26	5.344	143	6.554	19.852	50	5.295	37	10.145
$\emptyset$	<b>20.561</b>	<b>22</b>	<b>3.950</b>	<b>145</b>	<b>6.258</b>	<b>18.887</b>	<b>41</b>	<b>4.786</b>	<b>36</b>	<b>9.449</b>

Tabelle A.11: Gewichtung der Zielwerte von Szenario 3 (Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO				EDD				SPT				FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1		0,00	0,13	0,06	0,13	0,87	0,00	0,00	0,97	1,00	0,51	0,96	1,00	0,14	1,00	1,00	0,00
2		0,00	0,09	0,03	0,04	1,00	0,00	0,00	0,91	0,71	0,59	0,67	1,00	0,13	1,00	1,00	0,00
3		0,00	0,05	0,06	0,09	0,57	0,00	0,00	0,95	1,00	0,59	1,00	1,00	0,05	1,00	0,90	0,00
4		0,10	0,08	0,05	0,09	1,00	0,00	0,00	0,93	0,90	0,49	0,84	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5		0,19	0,09	0,16	0,14	1,00	0,00	0,00	0,91	0,84	0,64	0,84	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
6		0,00	0,08	0,07	0,01	0,83	0,00	0,00	1,00	1,00	0,45	0,61	0,95	0,29	1,00	1,00	0,00
7		0,00	0,03	0,21	0,07	0,90	0,00	0,00	0,88	1,00	0,67	0,93	1,00	0,02	1,00	1,00	0,00
8		0,00	0,21	0,06	0,09	1,00	0,00	0,00	0,89	0,72	0,61	0,85	1,00	0,15	1,00	1,00	0,00
9		0,01	0,00	0,00	0,07	1,00	0,00	0,00	0,84	0,59	0,60	0,80	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
10		0,00	0,07	0,13	0,11	0,92	0,00	0,00	0,91	1,00	0,56	0,81	1,00	0,17	1,00	1,00	0,00
11		0,26	0,16	0,11	0,12	0,80	0,00	0,00	0,93	1,00	0,75	0,70	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
12		0,00	0,14	0,07	0,08	0,72	0,00	0,00	0,95	1,00	0,38	1,00	1,00	0,55	1,00	0,92	0,00
13		0,19	0,10	0,11	0,12	1,00	0,00	0,00	1,00	0,99	0,48	0,79	0,99	0,00	1,00	1,00	0,00
14		0,11	0,08	0,00	0,26	1,00	0,00	0,02	1,00	0,79	0,42	1,00	0,98	0,00	1,00	0,93	0,00
15		0,00	0,02	0,25	0,15	1,00	0,00	0,00	0,86	0,84	0,56	0,77	1,00	0,45	1,00	1,00	0,00
16		0,11	0,14	0,13	0,06	0,91	0,00	0,00	0,93	1,00	0,50	0,73	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
17		0,00	0,18	0,06	0,10	0,71	0,00	0,00	0,90	1,00	0,64	0,82	1,00	0,07	1,00	1,00	0,00
18		0,46	0,00	0,00	0,11	0,86	0,00	0,00	0,95	1,00	0,53	0,97	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
19		0,20	0,04	0,00	0,16	0,95	0,00	0,13	0,89	1,00	0,51	1,00	1,00	0,00	1,00	0,87	0,00
20		0,23	0,08	0,09	0,16	0,89	0,00	0,00	0,98	1,00	0,63	0,58	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
21		0,26	0,00	0,08	0,25	1,00	0,06	0,00	0,95	0,60	0,52	0,73	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
22		0,05	0,13	0,09	0,15	1,00	0,00	0,00	0,93	0,97	0,50	0,94	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
23		0,39	0,11	0,07	0,05	0,89	0,00	0,00	0,96	1,00	0,62	0,61	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
24		0,00	0,09	0,07	0,14	0,81	0,00	0,00	0,95	1,00	0,72	0,93	1,00	0,16	1,00	1,00	0,00
25		0,00	0,07	0,11	0,12	0,28	0,00	0,00	0,96	1,00	0,47	0,79	1,00	0,37	1,00	1,00	0,00
26		0,43	0,03	0,03	0,10	0,65	0,00	0,00	0,90	1,00	0,55	0,74	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
27		0,00	0,10	0,06	0,16	0,82	0,00	0,00	0,92	1,00	0,48	0,76	1,00	0,51	1,00	1,00	0,00
28		0,00	0,13	0,05	0,21	1,00	0,00	0,00	0,94	1,00	0,60	0,71	1,00	0,50	1,00	1,00	0,00
29		0,01	0,09	0,11	0,08	0,86	0,00	0,00	0,89	1,00	0,60	0,62	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
30		0,41	0,04	0,06	0,19	0,92	0,00	0,00	0,96	1,00	0,51	1,00	1,00	0,00	1,00	0,99	0,00
∅		<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,87</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,55</b>	<b>0,82</b>	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,00</b>

Tabelle A.12: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung von Szenario 3 (Problem-Instanzen 1 - 30)

	gleichverteilt				kapazitätsorientiert				liefertreueorientiert				streng liefertreueorientiert			
$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,08	0,46	0,87	0,53	0,07	0,74	0,95	0,25	0,09	0,18	0,79	0,81	ISPO	EDD	SPT	FAM
2	0,04	0,48	0,74	0,53	0,03	0,76	0,81	0,25	0,05	0,19	0,67	0,81	0,09	0,09	0,76	0,91
3	0,05	0,38	0,90	0,49	0,05	0,61	0,96	0,21	0,05	0,15	0,84	0,77	0,06	0,10	0,65	0,91
4	0,08	0,48	0,81	0,50	0,09	0,77	0,89	0,20	0,07	0,19	0,72	0,80	0,05	0,08	0,82	0,86
5	0,15	0,48	0,83	0,50	0,16	0,76	0,88	0,20	0,13	0,19	0,77	0,80	0,07	0,10	0,69	0,90
6	0,04	0,46	0,75	0,57	0,02	0,73	0,89	0,32	0,06	0,18	0,62	0,83	0,13	0,10	0,76	0,90
7	0,08	0,44	0,90	0,50	0,05	0,71	0,96	0,21	0,10	0,18	0,84	0,80	0,07	0,09	0,57	0,91
8	0,09	0,47	0,79	0,54	0,06	0,76	0,83	0,26	0,12	0,19	0,75	0,82	0,11	0,09	0,82	0,90
9	0,02	0,46	0,75	0,50	0,03	0,73	0,77	0,20	0,01	0,18	0,72	0,80	0,13	0,09	0,74	0,91
10	0,08	0,46	0,84	0,54	0,06	0,73	0,94	0,27	0,09	0,18	0,75	0,82	0,00	0,09	0,71	0,90
11	0,16	0,43	0,86	0,50	0,18	0,69	0,95	0,20	0,14	0,17	0,78	0,80	0,09	0,09	0,72	0,91
12	0,07	0,42	0,84	0,62	0,05	0,67	0,94	0,41	0,09	0,17	0,75	0,82	0,14	0,09	0,75	0,90
13	0,13	0,50	0,81	0,50	0,15	0,80	0,92	0,20	0,11	0,20	0,71	0,80	0,10	0,08	0,72	0,89
14	0,11	0,51	0,80	0,48	0,16	0,80	0,85	0,19	0,07	0,21	0,74	0,77	0,11	0,10	0,67	0,90
15	0,10	0,47	0,79	0,61	0,09	0,75	0,87	0,38	0,12	0,19	0,72	0,84	0,05	0,11	0,73	0,87
16	0,11	0,46	0,81	0,50	0,09	0,74	0,92	0,20	0,12	0,18	0,69	0,80	0,13	0,09	0,69	0,92
17	0,08	0,40	0,87	0,52	0,06	0,65	0,95	0,23	0,11	0,16	0,78	0,81	0,13	0,09	0,65	0,90
18	0,14	0,45	0,87	0,50	0,23	0,72	0,95	0,20	0,06	0,18	0,80	0,80	0,11	0,08	0,76	0,90
19	0,10	0,49	0,88	0,47	0,15	0,75	0,95	0,19	0,05	0,24	0,80	0,75	0,03	0,09	0,77	0,90
20	0,14	0,47	0,80	0,50	0,17	0,75	0,92	0,20	0,10	0,19	0,68	0,80	0,04	0,15	0,78	0,84
21	0,15	0,50	0,71	0,50	0,21	0,79	0,77	0,20	0,08	0,22	0,66	0,80	0,09	0,09	0,64	0,90
22	0,10	0,48	0,85	0,50	0,10	0,77	0,93	0,20	0,11	0,19	0,77	0,80	0,06	0,12	0,64	0,90
23	0,15	0,46	0,81	0,50	0,19	0,74	0,92	0,20	0,12	0,19	0,69	0,80	0,11	0,10	0,74	0,90
24	0,08	0,44	0,91	0,54	0,07	0,71	0,97	0,27	0,08	0,18	0,86	0,82	0,10	0,09	0,65	0,90
25	0,07	0,31	0,82	0,59	0,06	0,50	0,93	0,35	0,08	0,12	0,70	0,84	0,08	0,09	0,84	0,91
26	0,15	0,39	0,82	0,50	0,22	0,62	0,93	0,20	0,08	0,15	0,72	0,80	0,09	0,06	0,67	0,92
27	0,08	0,44	0,81	0,63	0,08	0,70	0,92	0,40	0,08	0,17	0,70	0,85	0,05	0,08	0,68	0,90
28	0,10	0,48	0,83	0,62	0,10	0,77	0,93	0,40	0,09	0,19	0,72	0,85	0,08	0,09	0,66	0,93
29	0,07	0,44	0,81	0,50	0,05	0,70	0,92	0,20	0,09	0,18	0,69	0,80	0,09	0,10	0,69	0,92
30	0,17	0,47	0,88	0,50	0,25	0,75	0,95	0,20	0,10	0,19	0,80	0,80	0,09	0,09	0,65	0,90
$\emptyset$	0,10	0,45	0,83	0,53	0,11	0,72	0,91	0,25	0,09	0,18	0,74	0,81	0,09	0,09	0,71	0,90

## A4: Szenario 4

Tabelle A.13: Zusammenfassung der Zielwerte MISO und EDD von Szenario 4  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO					EDD				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	18.686	3	29	51	8.817	21.576	0	0	141	9.898
2	18.193	0	0	49	8.300	20.344	0	0	145	9.313
3	17.850	1	363	47	8.434	20.530	0	0	139	9.431
4	20.236	0	0	70	10.231	22.930	0	0	142	10.916
5	17.901	0	0	51	8.581	21.391	0	0	145	9.489
6	16.339	0	0	54	7.956	19.358	0	0	148	8.981
7	21.147	0	0	59	9.470	22.855	0	0	139	10.126
8	21.626	0	0	67	9.908	23.373	0	0	143	10.980
9	15.909	1	78	49	7.685	18.019	0	0	138	8.590
10	17.669	0	0	49	8.498	20.483	0	0	146	10.079
11	17.914	1	469	55	8.654	20.494	0	0	144	9.708
12	20.218	2	236	57	10.259	21.608	0	0	138	10.822
13	21.945	4	156	62	9.815	23.392	3	542	139	10.567
14	17.927	2	490	54	8.062	19.763	0	0	136	9.135
15	19.003	0	0	50	8.722	21.630	0	0	144	9.921
16	20.284	0	0	66	9.368	22.993	1	449	145	10.828
17	19.405	3	173	52	8.897	20.616	0	0	145	9.973
18	19.457	4	186	53	8.487	22.198	0	0	139	9.878
19	18.917	7	305	52	8.490	20.851	0	0	140	9.784
20	19.676	5	411	56	9.841	21.385	0	0	137	10.741
21	18.004	3	233	51	8.214	20.620	0	0	143	9.869
22	19.441	1	235	60	8.747	20.197	0	0	143	9.580
23	20.763	1	46	58	9.400	22.591	0	0	145	10.701
24	16.353	2	99	52	8.174	19.224	0	0	145	9.543
25	16.484	0	0	57	8.069	18.202	0	0	139	9.087
26	17.864	1	633	54	8.241	20.143	0	0	142	9.277
27	17.521	2	231	53	8.527	18.747	0	0	140	9.543
28	18.613	0	0	53	9.289	20.169	0	0	146	10.284
29	18.597	7	191	51	8.573	19.663	0	0	142	9.609
30	17.167	4	160	48	8.340	19.957	0	0	146	9.263
$\emptyset$	<b>18.704</b>	<b>2</b>	<b>157</b>	<b>55</b>	<b>8.802</b>	<b>20.843</b>	<b>0</b>	<b>33</b>	<b>142</b>	<b>9.864</b>



Tabelle A.14: Zusammenfassung der Zielwerte SPT und FP von Szenario 4  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	SPT					FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	22.611	29	3.658	146	7.037	19.800	41	4.342	37	9.407
2	20.653	21	4.254	153	6.634	18.325	36	5.009	36	8.804
3	19.859	19	3.835	151	6.645	19.599	34	4.242	37	8.897
4	23.271	29	4.036	149	7.016	20.056	43	6.873	38	11.004
5	22.479	25	3.193	147	6.753	19.091	44	5.227	38	9.372
6	18.034	22	3.385	152	6.245	16.214	37	3.698	38	8.130
7	24.167	30	3.850	146	7.044	21.184	46	5.424	38	9.564
8	24.519	29	4.743	150	7.352	21.095	52	4.870	37	10.220
9	17.688	24	3.370	148	6.264	16.107	28	3.328	37	7.969
10	21.771	24	3.313	146	6.524	18.153	32	5.002	36	8.909
11	21.129	22	2.978	151	6.553	17.781	41	4.858	37	9.374
12	22.869	38	4.495	150	7.039	20.346	41	6.435	36	10.197
13	23.485	27	3.857	146	7.195	21.147	47	5.285	37	10.526
14	20.116	29	3.514	149	6.474	17.618	51	4.712	37	9.025
15	21.571	18	3.315	143	6.741	19.379	35	5.013	38	9.244
16	24.845	31	4.047	150	7.034	21.720	49	5.605	38	9.845
17	22.535	25	3.316	150	6.576	18.146	40	4.573	37	8.990
18	21.288	28	4.010	150	6.916	19.661	36	4.100	37	8.834
19	20.093	26	4.454	152	6.703	17.779	37	4.733	37	8.610
20	22.287	34	4.277	152	7.178	18.981	44	6.480	38	10.250
21	20.414	30	3.667	152	6.711	17.772	45	5.013	37	9.166
22	20.404	29	4.561	146	6.522	19.876	44	5.255	38	8.845
23	22.499	32	3.620	151	7.079	19.896	50	5.392	37	10.876
24	19.121	28	4.311	147	6.622	17.323	40	4.345	38	8.948
25	19.017	24	2.712	146	6.444	16.825	40	4.777	37	8.830
26	19.881	24	3.487	152	6.592	17.533	37	5.771	36	9.016
27	18.903	26	3.795	152	6.498	17.212	37	4.020	38	8.649
28	20.333	22	4.418	149	6.635	18.007	34	4.572	37	9.183
29	19.944	31	3.099	148	6.488	17.223	44	4.997	37	9.394
30	19.732	24	3.563	144	6.489	17.930	42	5.447	38	9.092
<b>∅</b>	<b>21.184</b>	<b>27</b>	<b>3.771</b>	<b>149</b>	<b>6.733</b>	<b>18.726</b>	<b>41</b>	<b>4.980</b>	<b>37</b>	<b>9.306</b>

Tabelle A.15: Gewichtung der Zielwerte von Szenario 4 (Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO				EDD				SPT				FP			
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$
1	0,00	0,07	0,01	0,13	0,74	0,00	0,00	0,95	1,00	0,71	0,84	1,00	0,28	1,00	1,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,11	0,87	0,00	0,00	0,93	1,00	0,58	0,85	1,00	0,05	1,00	1,00	0,00
3	0,00	0,03	0,09	0,09	1,00	0,00	0,00	0,89	0,75	0,56	0,90	1,00	0,65	1,00	1,00	0,00
4	0,06	0,00	0,00	0,29	0,89	0,00	0,00	0,94	1,00	0,67	0,59	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,12	0,76	0,00	0,00	0,98	1,00	0,57	0,61	1,00	0,26	1,00	1,00	0,00
6	0,04	0,00	0,00	0,14	1,00	0,00	0,00	0,96	0,58	0,59	0,92	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,19	0,57	0,00	0,00	0,94	1,00	0,65	0,71	1,00	0,01	1,00	1,00	0,00
8	0,16	0,00	0,00	0,27	0,67	0,00	0,00	0,94	1,00	0,56	0,97	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
9	0,00	0,04	0,02	0,11	1,00	0,00	0,00	0,91	0,84	0,86	1,00	1,00	0,09	1,00	0,99	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,12	0,69	0,00	0,00	1,00	1,00	0,75	0,66	1,00	0,12	1,00	1,00	0,00
11	0,04	0,02	0,10	0,16	0,81	0,00	0,00	0,94	1,00	0,54	0,61	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
12	0,00	0,05	0,04	0,18	0,52	0,00	0,00	0,89	1,00	0,93	0,70	1,00	0,05	1,00	1,00	0,00
13	0,34	0,02	0,00	0,23	0,96	0,00	0,08	0,94	1,00	0,55	0,72	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
14	0,12	0,04	0,10	0,15	0,86	0,00	0,00	0,88	1,00	0,57	0,75	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,11	1,00	0,00	0,00	1,00	0,98	0,51	0,66	0,99	0,14	1,00	1,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,25	0,59	0,02	0,08	0,96	1,00	0,63	0,72	1,00	0,31	1,00	1,00	0,00
17	0,29	0,08	0,04	0,13	0,56	0,00	0,00	0,96	1,00	0,63	0,73	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
18	0,00	0,11	0,05	0,14	1,00	0,00	0,00	0,90	0,67	0,78	0,98	1,00	0,07	1,00	1,00	0,00
19	0,37	0,19	0,06	0,13	1,00	0,00	0,00	0,90	0,75	0,70	0,94	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
20	0,21	0,11	0,06	0,16	0,73	0,00	0,00	0,87	1,00	0,77	0,66	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
21	0,08	0,07	0,05	0,12	1,00	0,00	0,00	0,92	0,93	0,67	0,73	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
22	0,00	0,02	0,04	0,20	0,79	0,00	0,00	0,97	1,00	0,66	0,87	1,00	0,45	1,00	1,00	0,00
23	0,32	0,02	0,01	0,18	1,00	0,00	0,00	0,95	0,97	0,64	0,67	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
24	0,00	0,05	0,02	0,13	1,00	0,00	0,00	0,98	0,96	0,70	0,99	1,00	0,34	1,00	1,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,18	0,68	0,00	0,00	0,94	1,00	0,60	0,57	1,00	0,13	1,00	1,00	0,00
26	0,13	0,03	0,11	0,16	1,00	0,00	0,00	0,91	0,90	0,65	0,60	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
27	0,18	0,05	0,06	0,13	0,91	0,00	0,00	0,89	1,00	0,70	0,94	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
28	0,26	0,00	0,00	0,14	0,93	0,00	0,00	0,97	1,00	0,65	0,97	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
29	0,50	0,16	0,04	0,13	0,90	0,00	0,00	0,95	1,00	0,70	0,62	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
30	0,00	0,10	0,03	0,09	1,00	0,00	0,00	1,00	0,92	0,57	0,65	0,98	0,27	1,00	1,00	0,00
∅	<b>0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,16</b>	<b>0,85</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,65</b>	<b>0,77</b>	<b>1,00</b>	<b>0,11</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>

Tabelle A.16: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung von Szenario 4 (Problem-Instanzen 1 - 30)

	gleichverteilt				kapazitätsorientiert				liefertreueorientiert				streng liefertreueorientiert			
$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,05	0,42	0,89	0,57	0,06	0,68	0,95	0,31	0,04	0,17	0,82	0,83	0,04	0,08	0,80	0,91
2	0,03	0,45	0,86	0,51	0,04	0,72	0,94	0,22	0,01	0,18	0,77	0,81	0,01	0,09	0,74	0,90
3	0,05	0,47	0,80	0,66	0,05	0,76	0,85	0,46	0,05	0,19	0,76	0,87	0,06	0,09	0,75	0,93
4	0,09	0,46	0,82	0,50	0,14	0,73	0,93	0,20	0,03	0,18	0,70	0,80	0,02	0,09	0,67	0,90
5	0,03	0,44	0,79	0,56	0,05	0,70	0,92	0,30	0,01	0,17	0,67	0,83	0,01	0,09	0,63	0,91
6	0,05	0,49	0,77	0,50	0,07	0,79	0,78	0,20	0,02	0,20	0,76	0,80	0,01	0,10	0,76	0,90
7	0,05	0,38	0,84	0,50	0,08	0,60	0,94	0,20	0,02	0,15	0,74	0,80	0,01	0,08	0,71	0,90
8	0,11	0,40	0,88	0,50	0,17	0,64	0,95	0,20	0,04	0,16	0,81	0,80	0,02	0,08	0,79	0,90
9	0,04	0,48	0,93	0,52	0,05	0,76	0,92	0,24	0,03	0,19	0,93	0,80	0,03	0,10	0,93	0,90
10	0,03	0,42	0,85	0,53	0,05	0,67	0,94	0,25	0,01	0,17	0,76	0,81	0,01	0,08	0,74	0,91
11	0,08	0,44	0,79	0,50	0,09	0,70	0,91	0,20	0,07	0,17	0,66	0,80	0,06	0,09	0,62	0,90
12	0,07	0,35	0,91	0,51	0,08	0,57	0,96	0,22	0,05	0,14	0,85	0,80	0,05	0,07	0,83	0,90
13	0,15	0,49	0,82	0,50	0,23	0,77	0,93	0,20	0,07	0,22	0,71	0,80	0,04	0,13	0,67	0,90
14	0,10	0,44	0,83	0,50	0,12	0,70	0,93	0,20	0,08	0,17	0,73	0,80	0,08	0,09	0,69	0,90
15	0,03	0,50	0,79	0,54	0,05	0,80	0,90	0,26	0,01	0,20	0,67	0,81	0,01	0,10	0,63	0,91
16	0,06	0,41	0,84	0,58	0,10	0,63	0,94	0,33	0,03	0,20	0,74	0,83	0,01	0,12	0,71	0,92
17	0,13	0,38	0,84	0,50	0,18	0,61	0,94	0,20	0,09	0,15	0,74	0,80	0,07	0,08	0,71	0,90
18	0,07	0,48	0,86	0,52	0,07	0,76	0,84	0,23	0,08	0,19	0,87	0,81	0,08	0,10	0,87	0,90
19	0,19	0,47	0,85	0,50	0,23	0,76	0,87	0,20	0,15	0,19	0,83	0,80	0,14	0,09	0,83	0,90
20	0,14	0,40	0,86	0,50	0,16	0,64	0,94	0,20	0,11	0,16	0,77	0,80	0,10	0,08	0,74	0,90
21	0,08	0,48	0,83	0,50	0,09	0,77	0,91	0,20	0,07	0,19	0,75	0,80	0,06	0,10	0,73	0,90
22	0,07	0,44	0,88	0,61	0,09	0,70	0,95	0,38	0,05	0,18	0,81	0,85	0,04	0,09	0,79	0,92
23	0,13	0,49	0,82	0,50	0,21	0,78	0,92	0,20	0,06	0,19	0,72	0,80	0,04	0,10	0,69	0,90
24	0,05	0,50	0,91	0,58	0,06	0,79	0,95	0,34	0,04	0,20	0,87	0,83	0,04	0,10	0,86	0,92
25	0,05	0,40	0,79	0,53	0,07	0,65	0,92	0,25	0,02	0,16	0,67	0,81	0,01	0,08	0,63	0,91
26	0,10	0,48	0,79	0,50	0,13	0,77	0,89	0,20	0,08	0,19	0,69	0,80	0,08	0,10	0,66	0,90
27	0,11	0,45	0,91	0,50	0,14	0,72	0,96	0,20	0,08	0,18	0,86	0,80	0,07	0,09	0,84	0,90
28	0,10	0,48	0,90	0,50	0,16	0,76	0,96	0,20	0,04	0,19	0,85	0,80	0,02	0,10	0,83	0,90
29	0,21	0,46	0,83	0,50	0,27	0,74	0,93	0,20	0,14	0,18	0,73	0,80	0,12	0,09	0,70	0,90
30	0,05	0,50	0,78	0,57	0,05	0,80	0,88	0,31	0,06	0,20	0,68	0,83	0,06	0,10	0,65	0,91
∅	0,08	0,45	0,84	0,53	0,11	0,72	0,92	0,24	0,05	0,18	0,76	0,81	0,05	0,09	0,74	0,91

## A5: Szenario 5

Tabelle A.17: Zusammenfassung der Zielwerte MISO und EDD von Szenario 5  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO					EDD				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	22.959	0	0	87	11.379	25.506	0	0	147	12.761
2	23.328	0	0	87	11.027	26.507	1	407	143	12.391
3	23.425	0	0	87	11.463	26.250	2	180	149	13.100
4	22.601	0	0	72	10.616	25.736	0	0	141	12.007
5	22.134	0	0	79	10.839	24.841	0	0	145	12.439
6	22.071	0	0	83	11.331	25.118	0	0	142	12.744
7	22.176	0	0	77	11.208	24.829	2	145	142	12.665
8	21.415	0	0	79	10.859	24.524	0	0	146	12.345
9	23.619	1	369	86	10.952	26.649	7	548	147	12.644
10	21.372	0	0	74	10.729	24.941	0	0	141	12.244
11	22.618	0	0	78	11.381	25.910	1	147	143	12.813
12	22.509	0	0	91	10.682	25.838	0	0	150	12.069
13	22.489	0	0	77	10.706	25.989	0	0	149	12.359
14	23.387	4	312	89	11.650	26.521	21	635	138	12.930
15	21.450	0	0	77	10.862	24.230	0	0	145	12.273
16	23.149	0	0	77	11.249	26.261	4	459	144	12.921
17	21.879	0	0	88	10.899	23.649	1	339	147	12.353
18	22.930	1	52	86	11.481	25.540	6	283	144	12.797
19	22.633	0	0	84	10.925	25.690	0	0	148	12.551
20	20.969	0	0	83	11.131	23.955	0	0	151	12.553
21	22.682	2	167	92	12.065	25.808	4	408	142	13.327
22	22.861	0	0	82	11.125	26.019	4	254	138	12.412
23	20.835	0	0	76	10.071	23.253	0	0	140	11.553
24	20.932	0	0	77	10.426	23.841	0	0	138	11.811
25	23.060	0	0	78	11.757	26.033	0	0	141	13.015
26	22.295	0	0	74	10.482	24.957	1	563	141	12.232
27	23.320	0	0	83	11.417	25.868	0	0	145	12.778
28	21.983	0	0	71	10.198	25.226	0	0	144	11.863
29	23.366	0	0	83	11.743	25.593	0	0	142	13.237
30	23.475	0	0	98	11.328	25.125	0	0	143	12.485
$\emptyset$	<b>22.464</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>82</b>	<b>11.066</b>	<b>25.340</b>	<b>2</b>	<b>146</b>	<b>144</b>	<b>12.522</b>

Tabelle A.18: Zusammenfassung der Zielwerte SPT und FP von Szenario 5  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	SPT					FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$\bar{F}$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1	25.966	55	5.530	152	10.701	21.403	49	5.875	39	10.344
2	26.219	49	5.458	153	10.599	20.878	48	6.403	39	10.636
3	27.078	49	6.049	149	10.481	21.987	54	6.589	38	11.216
4	26.156	50	5.459	151	10.617	20.290	51	5.846	38	10.627
5	24.904	52	6.328	147	10.545	20.038	46	5.208	38	10.301
6	24.771	44	7.048	150	10.355	20.244	44	6.764	39	10.217
7	25.347	50	6.998	149	10.523	20.783	47	6.845	39	10.202
8	25.941	57	5.933	150	10.517	20.083	47	4.893	39	9.864
9	27.707	51	6.078	155	10.791	22.296	46	7.183	39	10.531
10	25.851	52	6.761	147	10.440	20.315	45	5.080	38	10.009
11	25.636	56	5.341	151	10.666	21.481	51	5.399	38	10.359
12	25.632	57	6.060	154	10.552	20.521	50	5.689	39	10.229
13	26.330	53	6.003	149	10.659	21.130	47	6.119	38	10.099
14	26.714	62	6.125	147	10.592	20.887	58	5.048	37	10.516
15	25.027	57	6.461	150	10.476	19.166	46	6.169	39	9.812
16	25.745	47	6.080	148	10.686	21.431	45	6.170	38	10.731
17	25.137	55	6.329	147	10.340	19.520	46	6.770	38	9.789
18	25.980	55	6.105	149	10.645	20.556	48	5.664	39	10.601
19	25.929	51	5.693	148	10.651	21.289	45	5.954	38	10.189
20	24.715	53	6.763	152	10.545	19.596	44	4.812	39	9.651
21	26.641	51	6.313	147	10.478	21.148	49	5.848	38	10.543
22	26.676	56	5.638	149	10.640	21.113	55	6.101	39	11.121
23	23.207	47	6.227	144	10.207	18.645	48	4.994	38	9.179
24	25.004	44	6.175	152	10.474	19.282	43	3.880	39	9.826
25	26.262	50	5.578	155	10.687	20.776	40	5.425	39	10.104
26	25.585	54	5.435	152	10.655	21.244	53	6.113	39	11.165
27	26.506	53	5.516	150	10.759	21.591	43	5.888	39	10.389
28	25.468	52	5.151	153	10.665	20.443	45	5.774	38	9.890
29	26.908	44	6.868	152	10.782	21.954	48	5.886	37	11.062
30	26.109	60	5.105	152	10.698	20.264	55	5.220	39	10.384
$\emptyset$	<b>25.838</b>	<b>52</b>	<b>6.020</b>	<b>150</b>	<b>10.581</b>	<b>20.678</b>	<b>48</b>	<b>5.787</b>	<b>38</b>	<b>10.320</b>

Tabelle A.19: Gewichtung der Zielwerte von Szenario 5 (Problem-Instanzen 1 - 30)

Verfahren	MISO				EDD				SPT				FP				
	Zielgröße	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$	$C_{max}$	$U$	$\bar{T}$	$MS_1$
1		0,34	0,00	0,00	0,42	0,90	0,00	0,00	0,96	1,00	1,00	0,94	1,00	0,00	0,89	1,00	0,00
2		0,44	0,00	0,00	0,42	1,00	0,02	0,06	0,91	0,95	1,00	0,85	1,00	0,00	0,98	1,00	0,00
3		0,28	0,00	0,00	0,44	0,84	0,04	0,03	1,00	1,00	0,91	0,92	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
4		0,39	0,00	0,00	0,30	0,93	0,00	0,00	0,91	1,00	0,98	0,93	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5		0,43	0,00	0,00	0,38	0,99	0,00	0,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,88	0,82	0,00
6		0,37	0,00	0,00	0,40	1,00	0,00	0,00	0,93	0,93	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,96	0,00
7		0,31	0,00	0,00	0,35	0,89	0,04	0,02	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,94	0,98	0,00
8		0,23	0,00	0,00	0,36	0,76	0,00	0,00	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,82	0,82	0,00
9		0,24	0,00	0,00	0,41	0,80	0,12	0,03	0,93	1,00	1,00	0,84	1,00	0,00	0,90	1,00	0,00
10		0,19	0,00	0,00	0,33	0,84	0,00	0,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,87	0,75	0,00
11		0,26	0,00	0,00	0,35	1,00	0,02	0,03	0,93	0,94	1,00	0,99	1,00	0,00	0,91	1,00	0,00
12		0,37	0,00	0,00	0,45	1,00	0,00	0,00	0,97	0,96	1,00	1,00	1,00	0,00	0,88	0,94	0,00
13		0,26	0,00	0,00	0,35	0,93	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	0,00	0,89	1,00	0,00
14		0,43	0,00	0,00	0,47	0,97	0,29	0,06	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,93	0,81	0,00
15		0,39	0,00	0,00	0,34	0,86	0,00	0,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,81	0,95	0,00
16		0,36	0,00	0,00	0,35	1,00	0,09	0,07	0,96	0,89	1,00	0,99	1,00	0,00	0,96	1,00	0,00
17		0,42	0,00	0,00	0,46	0,74	0,02	0,05	1,00	1,00	1,00	0,93	1,00	0,00	0,84	1,00	0,00
18		0,44	0,00	0,00	0,43	0,92	0,09	0,04	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,87	0,93	0,00
19		0,29	0,00	0,00	0,42	0,95	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	0,00	0,88	1,00	0,00
20		0,27	0,00	0,00	0,39	0,85	0,00	0,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,83	0,71	0,00
21		0,28	0,00	0,00	0,50	0,85	0,04	0,04	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,96	0,92	0,00
22		0,31	0,00	0,00	0,39	0,88	0,07	0,04	0,90	1,00	1,00	0,92	1,00	0,00	0,98	1,00	0,00
23		0,48	0,00	0,00	0,36	1,00	0,00	0,00	0,96	0,99	0,98	1,00	1,00	0,00	1,00	0,80	0,00
24		0,29	0,00	0,00	0,34	0,80	0,00	0,00	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,98	0,63	0,00
25		0,42	0,00	0,00	0,34	0,96	0,00	0,00	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,80	0,97	0,00
26		0,24	0,00	0,00	0,31	0,86	0,02	0,09	0,90	1,00	1,00	0,89	1,00	0,00	0,98	1,00	0,00
27		0,35	0,00	0,00	0,40	0,87	0,00	0,00	0,95	1,00	1,00	0,94	1,00	0,00	0,81	1,00	0,00
28		0,31	0,00	0,00	0,29	0,95	0,00	0,00	0,92	1,00	1,00	0,89	1,00	0,00	0,87	1,00	0,00
29		0,29	0,00	0,00	0,40	0,73	0,00	0,00	0,91	1,00	0,92	1,00	1,00	0,00	1,00	0,86	0,00
30		0,55	0,00	0,00	0,52	0,83	0,00	0,00	0,92	1,00	1,00	0,98	1,00	0,00	0,92	1,00	0,00
∅		<b>0,34</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,39</b>	<b>0,90</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	<b>0,00</b>

Tabelle A.20: Ergebnisse der gewichteten Zielfunktionswertermittlung von Szenario 5  
(Problem-Instanzen 1 - 30)

	gleichverteilt				kapazitätsorientiert				liefertreueorientiert				streng liefertreueorientiert			
$\omega_1$	0,25				0,4				0,1				0,05			
$\omega_2$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_3$	0,25				0,1				0,4				0,45			
$\omega_4$	0,25				0,4				0,1				0,05			
Datensatz	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP	MISO	EDD	SPT	FP
1	0,19	0,46	0,99	0,47	0,31	0,74	0,99	0,19	0,08	0,19	0,98	0,76	0,04	0,09	0,97	0,85
2	0,21	0,50	0,95	0,49	0,34	0,77	0,96	0,20	0,09	0,22	0,94	0,79	0,04	0,13	0,93	0,89
3	0,18	0,48	0,96	0,50	0,29	0,74	0,98	0,20	0,07	0,21	0,93	0,80	0,04	0,12	0,92	0,90
4	0,17	0,46	0,98	0,50	0,28	0,74	0,99	0,20	0,07	0,18	0,97	0,80	0,03	0,09	0,96	0,90
5	0,20	0,49	1,00	0,43	0,32	0,79	1,00	0,17	0,08	0,20	1,00	0,68	0,04	0,10	1,00	0,77
6	0,19	0,48	0,98	0,49	0,31	0,77	0,97	0,20	0,08	0,19	0,99	0,78	0,04	0,10	1,00	0,88
7	0,16	0,47	1,00	0,48	0,26	0,74	1,00	0,19	0,07	0,21	1,00	0,77	0,03	0,12	1,00	0,86
8	0,15	0,43	1,00	0,41	0,24	0,69	1,00	0,16	0,06	0,17	1,00	0,66	0,03	0,09	1,00	0,74
9	0,16	0,47	0,96	0,48	0,26	0,71	0,98	0,19	0,06	0,23	0,94	0,76	0,03	0,15	0,93	0,86
10	0,13	0,45	1,00	0,40	0,21	0,71	1,00	0,16	0,05	0,18	1,00	0,65	0,03	0,09	1,00	0,73
11	0,15	0,49	0,98	0,48	0,24	0,78	0,97	0,19	0,06	0,21	0,99	0,76	0,03	0,12	0,99	0,86
12	0,21	0,49	0,99	0,45	0,33	0,79	0,98	0,18	0,08	0,20	1,00	0,73	0,04	0,10	1,00	0,82
13	0,15	0,48	1,00	0,47	0,25	0,77	1,00	0,19	0,06	0,19	0,99	0,75	0,03	0,10	0,99	0,85
14	0,23	0,56	1,00	0,44	0,36	0,79	1,00	0,17	0,09	0,33	1,00	0,70	0,05	0,25	1,00	0,79
15	0,18	0,45	1,00	0,44	0,29	0,73	1,00	0,18	0,07	0,18	1,00	0,70	0,04	0,09	1,00	0,79
16	0,18	0,53	0,97	0,49	0,28	0,80	0,96	0,20	0,07	0,26	0,98	0,78	0,04	0,17	0,99	0,88
17	0,22	0,45	0,98	0,46	0,35	0,70	0,99	0,18	0,09	0,20	0,97	0,73	0,04	0,12	0,97	0,83
18	0,22	0,50	1,00	0,45	0,35	0,76	1,00	0,18	0,09	0,24	1,00	0,72	0,04	0,15	1,00	0,81
19	0,18	0,49	0,99	0,47	0,28	0,78	1,00	0,19	0,07	0,19	0,98	0,75	0,04	0,10	0,98	0,85
20	0,16	0,46	1,00	0,39	0,26	0,74	1,00	0,15	0,07	0,18	1,00	0,62	0,03	0,09	1,00	0,69
21	0,19	0,47	1,00	0,47	0,31	0,73	1,00	0,19	0,08	0,21	1,00	0,75	0,04	0,13	1,00	0,85
22	0,18	0,47	0,98	0,50	0,28	0,72	0,99	0,20	0,07	0,22	0,97	0,79	0,04	0,14	0,97	0,89
23	0,21	0,49	0,99	0,45	0,33	0,78	0,99	0,18	0,08	0,20	0,99	0,72	0,04	0,10	0,99	0,81
24	0,16	0,42	1,00	0,40	0,25	0,67	1,00	0,16	0,06	0,17	1,00	0,64	0,03	0,08	1,00	0,72
25	0,19	0,46	1,00	0,44	0,30	0,74	1,00	0,18	0,08	0,18	1,00	0,71	0,04	0,09	1,00	0,80
26	0,14	0,47	0,97	0,50	0,22	0,71	0,99	0,20	0,06	0,22	0,96	0,79	0,03	0,14	0,95	0,89
27	0,19	0,46	0,98	0,45	0,30	0,73	0,99	0,18	0,07	0,18	0,97	0,72	0,04	0,09	0,97	0,82
28	0,15	0,47	0,97	0,47	0,24	0,75	0,99	0,19	0,06	0,19	0,96	0,75	0,03	0,09	0,95	0,84
29	0,17	0,41	0,98	0,46	0,27	0,66	0,99	0,19	0,07	0,16	0,97	0,74	0,03	0,08	0,96	0,84
30	0,27	0,44	0,99	0,48	0,43	0,70	1,00	0,19	0,11	0,18	0,99	0,77	0,05	0,09	0,99	0,86
$\emptyset$	<b>0,18</b>	<b>0,47</b>	<b>0,99</b>	<b>0,46</b>	<b>0,29</b>	<b>0,74</b>	<b>0,99</b>	<b>0,18</b>	<b>0,07</b>	<b>0,20</b>	<b>0,98</b>	<b>0,74</b>	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>0,98</b>	<b>0,83</b>





## Abstract

Die Fertigungsfeinplanung in Unternehmen als komplexes Optimierungsproblem wird seit vielen Jahren untersucht. Steigende interne und externe Anforderungen erhöhen den Grad der Komplexität des Produktionssystems stetig. Reale Problemgrößen gehören in der Regel zur Klasse der NP-vollständigen Probleme, die aktuell nicht mit vertretbarer Rechenzeit exakt gelöst werden können. Dem gegenüber steht die Anforderung einer kontinuierlichen und echtzeitfähigen Entscheidungsfindung in der betrieblichen Praxis.

Die Arbeit entwickelt und beschreibt deshalb eine neue Methodik zur Fertigungsfeinplanung einer HFS-basierten Produktion, welche ein ganzheitliches Konzept zur echtzeitfähigen Feinplanung, den Entwurf eines selbstständig agierenden Feinplanungssystems zur prädikativ-reaktiven Entscheidungsfindung sowie die Entwicklung von neuen, hybriden Feinplanungsverfahren zur Lösung von komplexen Problemen einschließt. Damit wird sie den zukünftigen Anforderungen einer echtzeitfähigen Entscheidungsunterstützung gerecht.

Das dazu entwickelte MISO-Verfahren nutzt einen hybriden Simulationsansatz, der ereignisdiskrete und ratenbasierte Simulation kombiniert und damit die Vorteile beider Arten vereinigt. Zusätzlich werden neue, heuristische Optimierungsalgorithmen integriert, die eigens in dieser Arbeit zur Lösung von HFS-Problemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten entwickelt werden.

[www.ilm.ovgu.de](http://www.ilm.ovgu.de)

Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Fakultät für Maschinenbau  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

39106 Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 18604  
Telefax: 0391 - 67 12646  
ilm@ovgu.de