

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Adaptive Produktionssteuerung für  
Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende  
Reihenfolgebildung**

**Michael Richard Niehues**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
2. Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Die Dissertation wurde am 26.04.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.10.2016 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

VII

## Verzeichnis der Formelzeichen

XI

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation . . . . .	1
1.2	Thematische Einordnung . . . . .	3
1.2.1	Werkstattfertigung . . . . .	3
1.2.2	Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	5
1.2.3	Systeme der PPS . . . . .	9
1.2.4	Betriebsdaten und deren Erfassung . . . . .	11
1.3	Problemstellung . . . . .	12
1.4	Zielsetzung . . . . .	15
1.4.1	Ziel der Arbeit . . . . .	15
1.4.2	Spezifizierung des Untersuchungsbereichs . . . . .	16
1.5	Aufbau der Arbeit . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>19</b>
2.1	Ansätze zur Verbesserung der Werkstattsteuerung . . . . .	19
2.1.1	Ansätze der Produktionsregelung . . . . .	19
2.1.2	Sonstige Ansätze . . . . .	27
2.1.3	Fazit . . . . .	28
2.2	Optimierung der Maschinenbelegung . . . . .	31
2.2.1	Job Shop Scheduling Problem . . . . .	31
2.2.2	Lösungsalgorithmen . . . . .	36
2.2.3	Dynamisches Scheduling . . . . .	46
2.2.4	Fazit . . . . .	46
2.3	Steuerungsrelevante Problemfelder der Werkstattfertigung	47
2.3.1	Störungsidentifikation und -management . . . . .	48
2.3.2	Bewertung von Produktionsplanalternativen . . . . .	54
2.3.3	Ansätze zur Verbesserung der Datenerfassung . . . . .	60
2.4	Ableitung des Handlungsbedarfs . . . . .	63
<b>3</b>	<b>Rahmenbedingungen für das System zur Werkstattsteuerung</b>	<b>65</b>
3.1	Anforderungen . . . . .	65
3.2	Annahmen . . . . .	66

<b>4</b>	<b>Systemübersicht</b>	<b>69</b>
4.1	Ansatz der fertigungsbegleitenden Reihenfolgebildung . . . . .	69
4.1.1	Grundprinzip . . . . .	69
4.1.2	Reduktion der Modellkomplexität . . . . .	70
4.2	Systemkomponenten und Aufbau des Reglers . . . . .	73
4.3	Zielsystem . . . . .	75
4.3.1	Zielgrößennormierung durch Kostenbetrachtung . . . . .	75
4.3.2	Diskussion der reihenfolgeabhängigen Kostenbestandteile . . . . .	76
4.3.3	Zielfunktion zur Kostenbewertung . . . . .	88
4.3.4	Ermittlung der Kostensätze . . . . .	88
4.4	Datenmodell . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Störungsmanagement</b>	<b>91</b>
5.1	Identifikationsbezogene Störungsklassifizierung . . . . .	91
5.1.1	Ansatz . . . . .	91
5.1.2	Störungsklassen . . . . .	91
5.1.3	Störungsidentifikation . . . . .	95
5.2	Gültigkeitswiederherstellung und Störungsbewertung . . . . .	98
5.2.1	Wiederherstellung der Gültigkeit des Ablaufplans . . . . .	98
5.2.2	Störungsbewertung . . . . .	100
5.3	Strategien zur Störungsbehandlung . . . . .	102
5.3.1	Maßnahmen zur Störungsbehandlung . . . . .	102
5.3.2	Maßnahmenkaskaden . . . . .	106
5.3.3	Gesamtablauf des Störungsmanagements . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung</b>	<b>113</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	113
6.2	Repräsentation des Ablaufplans . . . . .	115
6.2.1	Variablendefinition . . . . .	115
6.2.2	Auftragsreihenfolgematrix . . . . .	115
6.2.3	Generierung einer Ausgangslösung (Kodierung) . . . . .	116
6.2.4	Berechnung des Ablaufplans (Scheduling) . . . . .	117
6.3	Operatoren . . . . .	118
6.3.1	Sequencing . . . . .	118
6.3.2	Fitnessfunktion . . . . .	123
6.3.3	Selektion . . . . .	124
6.3.4	Abbruchkriterium . . . . .	125
6.4	Randbedingungen . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Ortungsbasierte echtzeitnahe Datenerfassung</b>	<b>127</b>
7.1	Ortungstechnologien . . . . .	127
7.2	Zusammenhang zwischen Ort und Zustand . . . . .	127
7.2.1	Ansatz der Bewegungslogiken . . . . .	127

7.2.2	Gliederung der Werkstatt . . . . .	129
7.2.3	Definition des Ortungsobjektes . . . . .	132
7.2.4	Ableitung des Auftragsstatus . . . . .	132
7.2.5	Ableitung des Ressourcenstatus . . . . .	134
7.2.6	Maßnahmen zur exakten Flächenzuordnung . . . . .	134
7.3	Modellierung . . . . .	136
7.3.1	Modellierung der Werkstatt . . . . .	136
7.3.2	Modellierung der Bewegungslogiken . . . . .	137
7.3.3	Modellierung baulicher Restriktionen . . . . .	138
7.3.4	Erweiterung des Datenmodells . . . . .	138
7.4	Ablauf der ortungsbasierten Datenerfassung . . . . .	139
7.5	Korrektur und Ergänzung von Informationen . . . . .	139
7.5.1	Erweiterung um BDE/MDE . . . . .	141
7.5.2	Ergänzung manuell zu erfassender Daten . . . . .	142
<b>8</b>	<b>Technische Umsetzung und Bewertung</b>	<b>143</b>
8.1	Softwareprototyp zur Reihenfolgeoptimierung . . . . .	143
8.1.1	Allgemeines . . . . .	143
8.1.2	Initialisierung . . . . .	144
8.1.3	Generationenwechsel . . . . .	145
8.1.4	Parameterbestimmung . . . . .	145
8.1.5	Ergebnisse . . . . .	146
8.1.6	Untersuchung zur Planstabilität . . . . .	147
8.1.7	Kritische Betrachtung . . . . .	147
8.2	Simulationstechnisches Anwendungsbeispiel . . . . .	148
8.2.1	Beschreibung des Anwendungsbeispiels . . . . .	149
8.2.2	Datenbasis der Simulation . . . . .	150
8.2.3	Prämissen . . . . .	151
8.2.4	Aufbau des Simulationsmodells . . . . .	153
8.2.5	Modellvalidierung . . . . .	154
8.2.6	Simulationsszenarien und Kennzahlen . . . . .	155
8.2.7	Ergebnisse . . . . .	157
8.2.8	Kritische Betrachtung . . . . .	158
8.3	Realisierung der ortungsbasierten Datenerfassung . . . . .	159
8.3.1	Demonstrationsszenario . . . . .	160
8.3.2	Prototypische Umsetzung . . . . .	161
8.3.3	Ergebnis und kritische Betrachtung . . . . .	162
8.4	Technisch-wirtschaftliche Bewertung . . . . .	163
8.4.1	Technische Bewertung . . . . .	163
8.4.2	Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	165
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>171</b>

<b>A</b>	<b>Studie zur Werkstattfertigung in Deutschland</b>	<b>225</b>
A.1	Allgemeines . . . . .	225
A.2	Randbedingungen der Studie . . . . .	225
A.3	Ergebnisse der Studie . . . . .	226
A.4	Fragebogen . . . . .	236
<b>B</b>	<b>Ergänzende Ausführungen zur Reihenfolgeoptimierung</b>	<b>243</b>
B.1	Erzeugung ungültiger Lösungen . . . . .	243
B.2	Auswirkungen der Reparaturfunktion . . . . .	244
B.3	Steuerung der lokalen Suche . . . . .	245
<b>C</b>	<b>Versuchsdaten zur Umsetzung</b>	<b>247</b>
C.1	Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung . . . . .	247
C.1.1	Faktorbestimmung . . . . .	247
C.1.2	Vollfaktorielle Versuchspläne . . . . .	247
C.1.3	Ermittlung der Faktoreffekte . . . . .	263
C.1.4	Versuch zum Vergleich von Faktoreffektkombinationen	274
C.2	Simulationstechnisches Anwendungsbeispiel . . . . .	275
C.3	Ortungsbasierte Datenerfassung . . . . .	277
<b>D</b>	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>279</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen, welche im Duden aufgeführt sind, werden hier nicht explizit erläutert. Einige der aufgeführten englischen Abkürzungen bezeichnen in der wissenschaftlichen Literatur etablierte Methoden oder Konzepte, weshalb sie im Deutschen im Original übernommen und nicht übersetzt wurden. Die jeweilige Bedeutung ergibt sich entweder aus dem Kontext oder wird im Text erläutert. Abkürzungen, die ausschließlich in einer Abbildung oder Tabelle verwendet und an selber Stelle erläutert werden, sind an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt.

<b>ACO</b>	Ant Colony Optimization
<b>AF</b>	Anforderung
<b>AN</b>	Annahme
<b>APS</b>	Advanced Planning and Scheduling
<b>ARF</b>	Auftragsreihenfolgematrix
<b>BB</b>	Branch-and-Bound
<b>BDE</b>	Betriebsdatenerfassung
<b>BGD</b>	Bestandsgeregelte Durchflusssteuerung
<b>BL</b>	Bewegungslogik
<b>BOA</b>	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
<b>BOS-F</b>	Belastungsorientierte Fertigungssteuerung
<b>CPS</b>	Cyber-Physical System, dt. Cyber-Physisches System
<b>DBF</b>	Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e. V.
<b>DLZ</b>	Durchlaufzeit
<b>EOF</b>	Engpassorientierte Fertigungssteuerung
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning
<b>ES</b>	Evolutionstrategie
<b>FFS</b>	Flexibles Fertigungssystem

<b>FIFO</b>	First In – First Out
<b>FJSSP</b>	Flexible Job Shop Scheduling Problem
<b>ISI</b>	Institut für System- und Innovationsforschung
<b>GA</b>	Genetischer Algorithmus
<b>GRB</b>	Größte Restbearbeitungszeit
<b>HRPM</b>	High Resolution Production Management
<b>ID</b>	Identifikationsnummer
<b>IuK</b>	Informations- und Kommunikationstechnologien
<b>IT</b>	Informationstechnik
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
<b>JSSP</b>	Job Shop Scheduling Problem
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>KOBRA</b>	Kapazitätsorientierte und Bestandsgeregelte Auftragsfreigabe
<b>MAS</b>	Multiagentensystem
<b>MDE</b>	Maschinendatenerfassung
<b>MES</b>	Manufacturing Execution System
<b>MK</b>	Maßnahmenkaskade
<b>MRP II</b>	Manufacturing Resource Planning
<b>MTTR</b>	Mean Time To Restoration
<b>ODBC</b>	Open Database Connectivity
<b>OPT</b>	Optimized Production Technology
<b>PFB</b>	Pull-from-Bottleneck
<b>PPS</b>	Produktionsplanung und -steuerung
<b>REFA</b>	REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>S-/T</b>	Stellen-/Transitionen
<b>SA</b>	Simulated-Annealing-Algorithmus
<b>SB</b>	Shifting-Bottleneck-Algorithmus



<b>Sek.</b>	Sekunde
<b>STEM</b>	Step Method
<b>TA</b>	Threshold-Accepting-Algorithmus
<b>TCO</b>	Total Cost of Ownership
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<b>TS</b>	Tabu-Suche
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>ZE</b>	Zeiteinheit



## Verzeichnis der Formelzeichen

### Lateinische Formelzeichen

Größe	Bezeichnung
$a$	Maschinenbezogener Auftragsindex
$A_k$	Anzahl der Aufträge auf Maschine $k$ im Steuerungszeitraum
$AktO$	Aktuell zu bearbeitender Arbeitsvorgang
$AzNk$	Anzahl der Nachkommen
$AzO$	Anzahl der Arbeitsvorgänge
$AzVer$	Anzahl Versuche, gültige Nachkommen zu erzeugen
$b_{i,k}$	Position von $O_{i,k}$ in der globalen Reihenfolge
$BL$	Vektor der Bewegungslogik
$c$	Chromosom (kodierte Lösung $s$ )
$C$	Menge der konjunktiven Kanten
$C_i$	Bearbeitungsende und Durchlaufzeit von Auftrag $i$ im JSSP
$C_{max}$	Gesamtdurchlaufzeit
$d$	Distanz zweier Werte $b_{i,k}$
$D$	Menge der disjunktiven Kanten
$f$	Fitness einer Lösung $s$
$f_{L_k}$	Leerkostenfaktor von Maschine $k$
$F_{A_{ws}}$	Abholfläche von Werkstatt $ws$
$F_{B_k}$	Bereitstellfläche von Maschine $k$
$F_{DZL_{ws}}$	Dezentrale Zwischenlagerfläche von Werkstatt $ws$
$F_{F_k}$	Fertigungsfläche von Maschine $k$
$F_T$	Transport- und Verkehrsfläche
$F_Z$	Zusatzfläche
$F_{ZZL}$	Zentrale Zwischenlagerfläche
$g$	Gewichtungsfaktor
$gen$	Generation
$i$	Job- bzw. Auftragsindex

<b>Größe</b>	<b>Bezeichnung</b>
$j$	Index der Arbeitsoperation bzw. des Arbeitsvorgangs
$J$ bzw. $J_i$	Job bzw. Auftrag mit Index $i$
$k$	Maschinenindex
$K_F$	Fertigungskosten
$K_{ges}$	Zielfunktion, gesamte steuerungsrelevante Kosten
$K_L$	Lohnkosten
$K_{LKS}$	Lohnkostensatz
$K_{MH}$	Maschinenstundensatz
$K_N$	Nichtnutzungskosten
$K_R$	Rüstkosten
$K_{red}$	Reduzierte Zielfunktion
$K_t$	Transportkostensatz
$K_{t_{fix}}$	Kostensatz pro Sondertransport
$K_T$	Transportkosten
$K_V$	Verzugskosten
$K_{V_i}$	Verzugskosten von Auftrag $i$
$K_{V_0,i}$	Fixer Anteil von $K_{V_i}$
$K_{V_v,i}$	Variabler Anteil von $K_{V_i}$
$K_{W_{i,j,k}}$	Werkzeugkosten für Arbeitsvorgang $O_{i,j}$ auf Maschine $k$
$K_X$	Gemeinkosten des Betriebes
$L$	Auswahlvariable, letzter Arbeitsvorgang eines Auftrags im Steuerungszeitraum, $L \in j$
$m$	Anzahl Maschinen
$M$ bzw. $M_k$	Maschine (mit Index $k$ )
$n$	Anzahl Jobs bzw. Aufträge
$n_i$	Anzahl Operationen eines Auftrags
$n_{kV}$	Anzahl Generationen, in denen keine Verbesserung erreicht wurde
$n_{pop}$	Größe der Population
$N$	Anzahl Elemente bzw. Antworten
$N_s$	Nachbarschaft einer Lösung $s$
$O$	Ordnungsnummer $s$
$O_{i,j}$	$j$ te-Operation bzw. Arbeitsvorgang von Auftrag $i$
$p_{i,j}$	Prozessdauer von Operation $O_{i,j}$

<b>Größe</b>	<b>Bezeichnung</b>
$pop$	Population
$P_{Aktuell}$	Aktueller Ablaufplan
$P_{Init}$	Initialer Ablaufplan
$P_L$	Letzter Ablaufplan vor Störung
$P_{L-Opt}$	Letzter gesamt optimierter Ablaufplan
$P_{Mod}$	Durch Steuerungsmaßnahmen modifizierter Ablaufplan
$P_{Rep}$	Ablaufplan nach störungsbedingter Reparatur
$P_s$	Ablaufplan einer Lösung $s$ der Reihenfolgeoptimierung
$PR$	Prüfmatrix zur ARF
$R$	Rüstvorgang
$RZ$	Rüstzustand
$s$	Lösung (eines Optimierungsproblems)
$sp$	Index der Steuerungsperiode
$S$	Menge aller Lösungen
$s_{opt}$	Beste Lösung einer Generation
$S_{i,j}$	Ausführungsort von Arbeitsvorgang $O_{i,j}$
$S_0$	Aktueller Standort von Auftrag $i$
$t_{A_{i,j}}$	Ausführungszeit von Arbeitsvorgang $O_{i,j}$
$t_{B_{a,k}}$	Belegungszeit von Arbeitsvorgang $a$ auf Maschine $k$
$t_{B_{i,j,k}}$	Belegungszeit von Arbeitsvorgang $O_{i,j}$ auf Maschine $k$
$t_{NNZ_k}$	Nichtnutzungszeit von Maschine $k$
$t_{Puffer_i}$	Pufferzeit zwischen $TAE_i$ und $TA_i$
$t_{R_{i,j}}$	Rüstzeit von Arbeitsvorgang $O_{i,j}$
$t_{Schlupf_i}$	Schlupfzeit von Auftrag $i$
$t_{Ü_{i,j}}$	Mindestübergangszeit von $O_{i,j}$ zu $O_{i,j+1}$
$t_{V_i}$	Verbleibende Durchführungszeit für Auftrag $i$
$T$	Temperatur (im Simulated-Annealing-Algorithmus)
$T_0$	Bewertungszeitpunkt
$TA_i$	Abgangstermin von Auftrag $i$
$TA_{Plan}$	Plan-Abgangstermin
$TAA_i$	Abgangsterminabweichung von Auftrag $i$
$TAB_i$	Bearbeitungsbeginn von Auftrag $i$
$TAE_i$	Bearbeitungsende von Auftrag $i$

<b>Größe</b>	<b>Bezeichnung</b>
$TAE_{Plan}$	Plan-Bearbeitungsende
$TOLA$	Akzeptanztoleranz, Abbruchkriterium der Anwendung von Steuerungsmaßnahmen
$TOL_{Akz}$	Akzeptanztoleranz einer Zielwertverschlechterung während der Reihenfolgeoptimierung
$TOL_S$	Toleranzwert, unter dem eine Störung ignoriert wird
$TOL_{SL-Opt}$	Toleranzwert, unter dem eine Störung in Bezug auf $P_{L-Opt}$ ignoriert wird
$TSPB_{sp}$	Beginn der Steuerungsperiode $sp$
$TSPE_{sp}$	Ende der Steuerungsperiode $sp$
$TVB_{i,j}$	Bearbeitungsbeginn von Operation $O_{i,j}$
$TVE_{i,j}$	Bearbeitungsende von Operation $O_{i,j}$
$TVT_{i,j}$	Transportbeginn zur $j$ -ten Operation von Auftrag $i$
$TVV_{i,j}$	Zeitpunkt, ab dem Auftrag $i$ für die $j$ -te Operation verfügbar ist
$TLVE_{sp,k}$	Bearbeitungsende der letzten Operation auf Maschine $k$ in Steuerungsperiode $sp$
$V$	Menge der Knoten
$w$	Führungsgröße
$ws$	Werkstattindex
$x$	Regelgröße
$y$	Stellgröße
$z$	Störgröße

## Griechische Formelzeichen

<b>Größe</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\delta$	Konstante zur Gewichtung des Zielwertverhältnisses
$\Delta$	Differenz
$\epsilon$	Faktor zur Erhöhung des Selektionsdrucks
$\mu_{i,j}$	Zugeordnete Maschine von Operation $O_{i,j}$ , $\in M_1, \dots, M_k$
$\sigma$	Standardabweichung
$\Upsilon_k$	Auslastung von Maschine $k$
$\omega_s$	Übernahmewahrscheinlichkeit der Lösung $s$

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die industrielle Produktion hat für den Wirtschaftsstandort Deutschland eine hohe Bedeutung (vgl. ABELE & REINHART 2011, S. 6ff.). Neben Großunternehmen begründet sich diese unter anderem durch einen stark von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) geprägten Maschinen- und Anlagenbau (vgl. ABELE ET AL. 2009; VDMA 2012, S. 6). Letzterer zeichnet sich u. a. durch variantenreiche Produkte und eine hohe Fertigungstiefe aus (vgl. PIELCZYK 1996, S. 77).

Produzierende Unternehmen unterliegen zwei Megatrends: Globalisierung und Dynamisierung der Produktlebenszyklen. Neben Chancen in Form neuer Absatzmärkte wirkt sich die Globalisierung durch einen gestiegenen Wettbewerb aus, der die Unternehmen gleichzeitig unter einen hohen Kostendruck setzt (vgl. ZÄH ET AL. 2005; ABELE & REINHART 2011, S. 11f.). Die Dynamisierung der Produktlebenszyklen (vgl. ABELE & REINHART 2011, S. 15f.) führt dagegen zu einer Verkürzung der Zeiträume zwischen zwei Produktgenerationen und somit zu einem Sinken der Stückzahlen pro Produkt. Gleichzeitig erhöht sich die Variantenvielfalt der Produkte (vgl. FELDMANN & SLAMA 2001). Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen die Unternehmen ihr Produktangebot schnell an die Marktbedürfnisse anpassen und gleichzeitig kostengünstig und in hoher Qualität produzieren (vgl. MEHRABI ET AL. 2002; ZÄH ET AL. 2005).

Für die Produktion hochindividueller Produkte, z. B. im Maschinen- und Anlagenbau, sind Produktionssysteme erforderlich, in denen eine Vielzahl verschiedener Fertigungsverfahren in unterschiedlichen Abfolgen flexibel eingesetzt werden können (FELDMANN & SLAMA 2001; SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007). Diesen Anforderungen werden Werkstattfertigungssysteme derzeit am besten gerecht (THEBUD 2007, S. 46f.). Die Bedeutung der Werkstattfertigung wird durch WIDMAIER (2000, S. 39), LETMATHE (2002, S. 76ff.) sowie eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie mit 125 kundenindividuell produzierenden Unternehmen bestätigt (s. Anhang A). 41,6% der befragten Unternehmen haben ihre Fertigung ganz oder teilweise nach dem Werkstattprinzip strukturiert, wobei der Anteil mit steigender Individualität der Produkte zunimmt.

In Bezug auf den zunehmenden Kostendruck ist eine wirtschaftliche Fertigung von großer Wichtigkeit (vgl. SCHUH & STICH 2013, S. 23). Zudem wird aus Kundensicht zunehmend eine hohe Liefertermintreue bei kurzer Lieferzeit

als Differenzierungsmerkmal am Markt wahrgenommen (vgl. MÜNZBERG & NYHUIS 2009; SCHUH & STICH 2013, S. 13). So haben sich z. B. im Maschinen- und Anlagenbau die geforderten Lieferzeiten wesentlich verkürzt (BRIEL 2009, S. 271ff.) bei gleichzeitig gestiegener Varianz in den Fertigungsprozessen (vgl. SCHUH & STICH 2013, S. 13).

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden in der Vergangenheit Konzepte zur Vereinfachung des Fertigungsablaufs, Integration und Flussorientierung, z. B. durch Methoden wie Just-in-Time, Gruppentechnologie oder Einzelstückfluss, in vielen Fällen verfolgt und umgesetzt (NEWMAN & MAFFEI 1999; vgl. auch DEUSE ET AL. 2007). Gleichwohl existiert ein großes Aufgabenfeld, dessen Komplexität nach wie vor den Einsatz der als ineffizient geltenden Werkstattfertigung erfordert (NEWMAN & MAFFEI 1999). Letzteres ist insbesondere durch die hohen Durchlaufzeiten und Bestände und der daraus resultierenden geringen Termintreue begründet (vgl. VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80) und wird durch die durchgeführte Studie (vgl. Abb. A.6 im Anhang) bestätigt. Somit ist die Leistungsfähigkeit der Werkstattfertigung konträr zu den kundenseitigen Anforderungen hinsichtlich Lieferzeit und -treue.

Zur Verringerung der Diskrepanz zwischen benötigter Fertigungsflexibilität auf der einen Seite und geforderter Termintreue bei kurzen Lieferterminen und niedrigen Kosten auf der anderen Seite bietet das nach KOBLASA & VAVRUŠKA (2013) häufig unterschätzte Feld der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ein hohes Potenzial. Die steigende Durchdringung der Fertigung mit modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) erhöht die Datenverfügbarkeit und Transparenz (vgl. FLEISCH ET AL. 2005, S. 3; MÄRTENS ET AL. 2007; SCHUH ET AL. 2007), so dass sich zur Erschließung des Potenzials die Entwicklung neuer Ansätze und Verfahren zur PPS sowie eine verstärkte IT-Unterstützung in der Produktion anbieten (vgl. SCHUTTEN 1998; ABELE & REINHART 2011, S. 132; SCHUH & STICH 2013, S. 32).

Um zum einen ein allgemeines Verständnis zu schaffen und zum anderen die Ursachen der niedrigen Leistungsfähigkeit der Werkstattfertigung, verglichen mit anderen Organisationstypen<sup>1</sup> und in Bezug auf die PPS, näher zu beleuchten, erfolgt im folgenden Abschnitt eine thematische Einordnung. Dabei werden die wichtigsten Grundlagen zur Werkstattfertigung und PPS im Allgemeinen sowie spezielle Ausprägungen der PPS für Werkstattumgebungen dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Konkretisierung der Problemstellung (Abschnitt 1.3) und Zielsetzung (Abschnitt 1.4) dieser Arbeit.

---

<sup>1</sup> Der Organisationstyp, auch Organisationsprinzip genannt, fasst nach WIENDAHL (2010, S. 29) die räumliche Anordnung der Betriebsmittel, die Art des Auftragsdurchlaufs durch die Fertigung sowie die Einbindung des Menschen zusammen.



## 1.2 Thematische Einordnung

### 1.2.1 Werkstattfertigung

Neben der Fließfertigung ist die Werkstattfertigung der am häufigsten vorkommende Organisationstyp in der industriellen Praxis (WIENDAHL 2010, S. 32). Die Werkstattfertigung ist nach dem Verrichtungsprinzip organisiert, d. h. gleichartige Betriebsmittel werden hinsichtlich Anordnung, Verantwortung und Kostenrechnung zusammengefasst (FANDEL ET AL. 2011, S. 19). Jeder Auftrag wird entsprechend der in seinem Arbeitsplan definierten technologischen Reihenfolge<sup>2</sup> zur Bearbeitung in die jeweiligen Werkstätten transportiert (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 14). Die Fließfertigung stellt den dazu konträren Organisationstyp dar, bei der die Betriebsmittel nach der technologischen Abfolge im Arbeitsplan der Erzeugnisse angeordnet sind (WIENDAHL 2010, S. 30f.). Dementsprechend sind Layouts der Werkstattfertigung typischerweise prozessbezogen angeordnet, während in der Fließfertigung produktbezogene Layouts vorherrschen (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 79; s. Abb. 1.1).

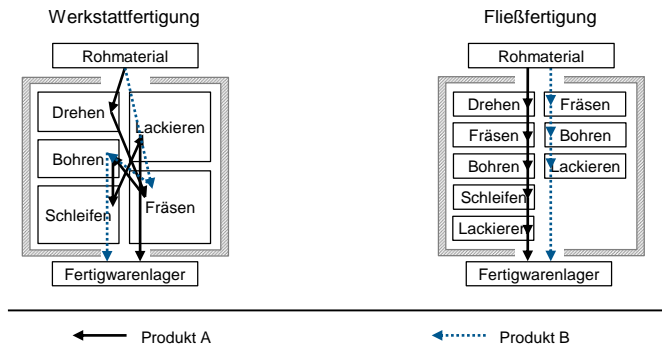


Abb. 1.1: Schematische Gegenüberstellung von Werkstatt- und Fließfertigung (in Anlehnung an REINHART ET AL. 2012)

Die Organisation nach dem Verrichtungsprinzip ermöglicht es, Werkstücke mit unterschiedlichen Fertigungsfolgen auf den gleichen Maschinen zu fertigen.<sup>3</sup> Das führt zu einem ungerichteten, stark vernetzten Materialfluss mit entsprechend hoher Komplexität (vgl. GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 14;

<sup>2</sup> Die technologische Folge, auch technologische Vorschrift (vgl. BIERWIRTH 1993, S. 9), Maschinen- (vgl. ZÄPFEL & BRAUNE 2005, S. 5f.), Arbeitsgang- (vgl. RIXEN 1997, S. 10) oder Prozessfolge genannt, bezeichnet die Anordnung der Arbeitsgänge eines Auftrags aufgrund technologischer Vorgaben (CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 537).

<sup>3</sup> Qualitative Flexibilität (vgl. LASCH & JANKER 2013, S. 93).

STOSIK 2005, S. 4f.). Weiterhin besteht eine hohe Flexibilität hinsichtlich kurzfristiger Änderungen im Produktionsablauf sowie in der Auftragsgröße.<sup>4</sup> Die Anpassungsfähigkeit gegenüber Änderungen, Kundenwünschen und Produktumstellungen ist hoch (vgl. MOROFF 1992, S. 212; JODLBAUER 2008, S. 10; VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80; BORNHÄUSER 2009, S. 16). Für weitere Ausführungen sei auf die Arbeit von KRÄMER (1968) verwiesen, in der eine umfassende Betrachtung des Werkstattprinzips erfolgt.

Aufgrund des heterogenen Produktspektrums variieren die Bearbeitungszeiten und Materialflüsse sehr stark (KINGSMAN ET AL. 1989), was eine Vielzahl an Koordinations- und Planungsaufgaben nach sich zieht (vgl. KIENER ET AL. 2012, S. 64f.). Des Weiteren bestehen bei Produktionsstart oft noch Lücken im vorgesehenen Fertigungsablauf durch unvollständige technische Unterlagen wie Zeichnungen, Stücklisten oder Arbeitspläne (GRONAU 2014, S. 129). Ein weiterer Nachteil ist die hohe Transportintensität aufgrund der räumlichen Trennung der einzelnen Werkstätten (KIENER ET AL. 2012, S. 65). Die häufig schubweisen Arbeits- und Transportvorgänge lassen sich zudem aus verschiedenen Gründen nicht exakt aufeinander abstimmen, was dazu führt, dass die Aufträge häufig auf ihren Transport oder ihre Bearbeitung warten müssen (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 14; FANDEL ET AL. 2011, S. 19). Auch hohe Umrüstzeiten steigern die Komplexität sowie die Schwankungen im Produktionsablauf erheblich (vgl. VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80). Unvorhergesehene Störungen und Abweichungen vom geplanten Auftragsdurchlauf sind somit stetige Begleiterscheinungen (WELLER 2002, S. 19f.; vgl. auch ROSE 1989, S. 4). Die Auswirkungen aller zuvor genannten Unregelmäßigkeiten werden durch hohe Zwischenbestände abgedämpft, sodass eine gute Auslastung der Maschinen gesichert wird (vgl. KIENER ET AL. 2012, S. 266f.). Nachteilig wirken sich die Umlaufbestände durch hohes gebundenes Umlaufvermögen (vgl. VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80) sowie hohe Auftragsdurchlaufzeiten (vgl. EVERSHEIM 1989, S. 26) aus. Ein Praxisbeispiel von WIENDAHL (2010, S. 31) weist einen Anteil der Rüst- und Bearbeitungszeiten an der Durchlaufzeit von 10 % auf, während der Anteil der aus Beständen resultierenden Liegezeit 85 % beträgt (vgl. auch BAUER ET AL. 1991, S. 3; PAWELLEK 2007, S. 33; ZHOU ET AL. 2008). Auch wenn die Nachteile der längeren Durchlaufzeiten durch einen in der Regel geringeren Fixkostenanteil sowie kleinerer Auftragslosgrößen relativiert wird (vgl. MOROFF 1992, S. 212), haben diese aufgrund der Kundenanforderung nach kurzen Lieferzeiten dennoch einen hohen negativen Einfluss auf die Logistikleistung der Werkstattfertigung.

Das Einsatzgebiet der Werkstattfertigung ist die variantenreiche Produktion für Einzel-, Kleinserien- oder Serienfertigung (vgl. LASCH & JANKER 2013, S. 93 sowie Abschnitt 1.1). Sie wird dort eingesetzt, wo aufgrund wechselnder,

---

<sup>4</sup> Quantitative Flexibilität (vgl. LASCH & JANKER 2013, S. 93; FANDEL ET AL. 2011, S. 19f.).

stark variierender Produkte mit unterschiedlichen Arbeitsfolgen und kleinen Losgrößen eine Produktionslinie nach dem Fließprinzip nicht wirtschaftlich ist (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80; MOROFF 1992, S. 212).

## 1.2.2 Produktionsplanung und -steuerung

### 1.2.2.1 Aufgaben und Ziele

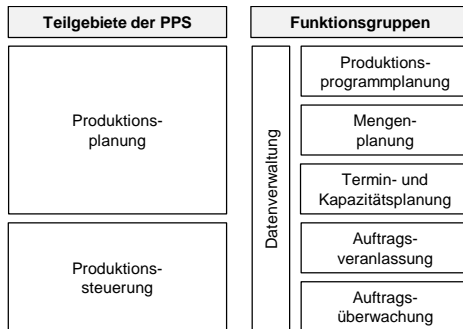
Die Koordination von Produktionsprozessen erfolgt durch die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Deren Kernaufgabe ist die „*Koordination der konkurrierenden Aufträge unter Beachtung des untergeordneten produktionswirtschaftlichen Zielsystems*“ (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 196). VDI ET AL. (1983, S. 167) definieren die Produktionsplanung als „*systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereitung von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.*“. Abgrenzend dazu ist die Produktionssteuerung definiert als „*Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen.*“ (VDI ET AL. 1983, S. 167). Letztere wird auch als *Fertigungssteuerung* (vgl. VDI 1983, S. 138) oder *Werkstattsteuerung* (vgl. REFA 1985, S. 329ff.) bezeichnet, wenn Bezug auf die Fertigung genommen wird. Die Produktionsplanung gestaltet somit die Produktionsprozesse vor deren Ausführung auf der Dispositionsebene, wohingegen die Produktionssteuerung während der Ausführung verändernd auf die Produktionsprozesse einwirkt (vgl. CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 576).

Das Ziel der Produktionssteuerung ist die weitestmögliche Realisierung der Planung, auch bei unvermeidlichen Änderungen von Auftragsmengen und -terminen, Störungen (z. B. Maschinenausfälle), Lieferverzügen und Ausschuss (WIENDAHL 1997, S. 12). Die zugehörigen Maßnahmen unterscheidet REFA (1985, S. 419) in Änderungen der vorgegebenen Planung (z. B. durch Neubestimmung der Auftragsfolge<sup>5</sup>) und Eingriff in den Fertigungsablauf. Dies kann zyklisch oder simultan zum Betriebsablauf stattfinden (VDI ET AL. 1983, S. 138). Störungen aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse, die ein akzeptierbares Ausmaß übersteigen (vgl. CORSTEN & GÖSSINGER 1997, S. 3ff.; GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 227; WIENDAHL 2010, S. 251f.), sowie unvollständige Informationen über Detailspekte des Produktionsprozesses, die erst während der Ausführung entschieden werden, erfordern nach CORSTEN & GÖSSINGER (2012, S. 576) eine eigenständige Produktionssteuerung, „*die erst während*

<sup>5</sup> Auftragsfolge bzw. organisatorische Folge bezeichnet die zeitliche Folge mehrerer Aufträge auf einer Maschine (CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 537). Im Kontext der Werkstattsteuerung wird die Maschinenfolge (s. Fußnote 2 auf S. 3) in der Regel als gegeben angenommen, während die Bildung der Auftragsfolge die Reihenfolgebildung als Stellhebel der PPS darstellt. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Reihenfolge somit stets auf die Auftragsfolge, während ein Bezug auf die Maschinenfolge explizit benannt wird.

der Prozessausführung in die Gestaltung von Produktionsprozessen eingreift“ (SCHÜTTE ET AL. 1999, S. 144f.).

Die Aufgaben der PPS, von SCHOMBURG (1980, S. 18ff.) als *Funktionsgruppen* bezeichnet, sind durch das in Abb. 1.2 dargestellte Modell von SCHOMBURG (1980, S. 18) und HACKSTEIN (1989, S. 4f.) den Teilgebieten Planung und Steuerung zugeordnet.



**Abb. 1.2:** Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung (HACKSTEIN 1989, S. 5; in Anlehnung an SCHOMBURG 1980, S. 18)

Während in der Produktionsplanung mit den Aufgaben der Produktionsprogrammplanung, der Mengenplanung (auch Materialbedarfsplanung, vgl. HANSMANN 2006, S. 253) und Termin- und Kapazitätsplanung der Produktionsprozess hinsichtlich Programm, Mengen, Terminen, Kapazitäten und Bearbeitungsreihenfolgen festgelegt wird, tragen die Aufgaben der Auftragsveranlassung und -überwachung dem Durchsetzungsgedanken der Produktionssteuerung Rechnung (vgl. SCHOMBURG 1980, S. 17ff.). Eine Querschnittsaufgabe ist dabei die Datenverwaltung, der die Speicherung und Pflege der steuerungsrelevanten statischen (Stammdaten) und dynamischen (Bewegungsdaten) Daten obliegt (vgl. SCHUH & ROESGEN 2006, S. 71ff.).

Der Übergang zwischen Planung und Steuerung ist in der Literatur nicht eindeutig nach o. g. Aufgaben unterschieden, sondern „vollzieht sich [...] an der Stelle, an der Planvorgaben in Durchsetzungsaktivitäten übergehen“ (CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 576). Dabei können einzelne Planungsaufgaben (z. B. Feinterminierung, Maschinenbelegung) auch der Produktionssteuerung zugeordnet sein (vgl. ZÄPFEL 2001, S. 60, HANSMANN 2006, S. 257ff.). Im Kontext dieser Arbeit ist der Zeitpunkt, ab dem ein Produktionsplan zur Produktion freigegeben wird, als Übergang zur Steuerung definiert.

Die Wirkzusammenhänge innerhalb der Produktionssteuerung bildet das Modell der Fertigungssteuerung von LÖDDING (2008, S. 5ff.; s. Abb. 1.3) ab, in

dem die Aufgaben Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung als Stellhebel zur Durchsetzung des Plans definiert sind. Auf Seite der Produktionsplanung steht dagegen die Auftragserzeugung als Festlegung von Planwerten für Zugang, Abgang und Reihenfolge (vgl. LÖDDING 2008, S. 7).

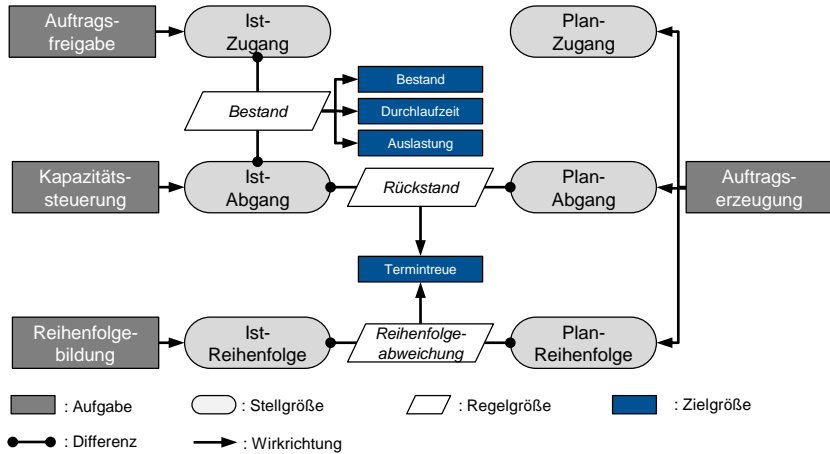


Abb. 1.3: Modell der Fertigungssteuerung (LÖDDING 2008, S. 7)

Die Zielgrößen der PPS *Bestand*, *Durchlaufzeit*, *Auslastung* und *Termintreue* zur Sicherstellung des Erreichens wirtschaftlicher und marktbezogener Anforderungen fasst WIENDAHL (2010, S. 252ff.) im Zielsystem der Produktionslogistik zusammen. Durch eine hohe interne Termintreue und kurze Auftragsdurchlaufzeiten können marktseitig kurze Lieferzeiten bei hoher Liefertreue erreicht werden. Auf Seite der Kosten sind geringe Prozesskosten durch eine hohe Maschinenauslastung sowie geringe Kapitalbindungskosten durch niedrige Bestände in der Fertigung zu erreichen. Da diese Ziele zum Teil widersprüchlich sind (*Dilemma der Ablaufplanung*, vgl. GUTENBERG 1955, S. 151ff. bzw. *Polylemma der Ablaufplanung*, vgl. HACKSTEIN 1989, S. 18), können die Zielgrößen nicht gleichermaßen gut erreicht werden (vgl. HACKSTEIN 1989, S. 17f.). Auftragsfertiger als Hauptanwender der Werkstattfertigung haben die Termintreue als oberstes Ziel (NYHUIS & WIENDAHL 2012, S. 4f.), für die sich auf Werkstattenebene die Ersatzziele Lieferterminterfüllung, Minimierung der Wartezeiten sowie Minimierung der (reihenfolgeabhängigen) Rüstzeiten ableiten (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 195). Dagegen tritt eine hohe Auslastung durch Minimierung der Maschinenstillstandszeiten eher in den Hintergrund (vgl. VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 196). Für die den Zielgrößen zugrundeliegenden Kennzahlen und deren Berechnungsformeln sei z. B. auf PAWELLEK (2007, S. 154ff.) verwiesen.

### 1.2.2.2 Ausprägung der PPS in der Werkstattfertigung

Die Anforderungen an die PPS sind in hohem Maße von der Fertigungsstruktur und den dort gefertigten Aufträgen abhängig (ARNOLD ET AL. 2008, S. 334f.). Dabei existieren in der Werkstattfertigung besondere Herausforderungen, die als externe und interne Dynamiken (LAND & GAALMAN 1996) bzw. Steuerungsunschärfe (MÜLLER ET AL. 2009) bezeichnet werden. Durch den hohen Kundenbezug treten häufig Eilaufträge sowie Produkt- und Mengenänderungen auf (externe Dynamiken), zudem prägen sich die internen Dynamiken z. B. als Maschinenstörungen, Qualitätsprobleme und geringer Prozesssicherheit aus. Diese Besonderheiten erfordern eine permanente Zuordnung von Arbeitsvorgängen auf Kapazitäten, wobei gleichzeitig verschiedene Aufträge um eine Kapazität konkurrieren (ZÄPFEL 1981, S. 221).

Etabliert hat sich mit der Einführung von informationstechnischen Systemen (IT-Systemen) das Konzept des Manufacturing Resource Planning (MRP II) von WIGHT (1984, s. auch ZÄPFEL 1994, S. 235ff.; KURBEL 2005, S. 135ff.). Im Wesentlichen umfasst MRP II die Bestimmung der terminierten Produktionsaufträge aus einem vorgegebenen Primärbedarfsprogramm (vgl. HANSMANN 2006, S. 248f.) unter Integration der Funktionsbereiche Beschaffung, Produktion, Verkauf und Finanzen (ZÄPFEL 1994, S. 237) durch eine gemeinsame Datenbasis (CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 591). Der Produktionsprozess ist hierarchisch strukturiert, der Planungsprozess verläuft sukzessiv.

Die Steuerung ist im MRP II-Konzept als Umsetzung der Produktionsplanung zu sehen und wird in der Praxis häufig als sog. Meistersteuerung mit Terminjägern (vgl. MARENBACH 1987, S. 5ff.) umgesetzt. Dabei obliegt dem Meister die Aufgabe, auf Basis der terminierten Fertigungsaufträge die Maschinenzuordnung und Reihenfolgebildung der Aufträge vorzunehmen. Die Entscheidungen orientierten sich dabei an der Intuition des Meisters (vgl. SHEIKH 2003, S. 16), weswegen zusätzlich sog. Terminjäger für die Terminüberwachung und den Informationsaustausch sorgen.

Eine Systematisierung der Reihenfolgebildung erfolgt über Prioritätsregeln. Hierbei wird konkurrierenden Aufträgen nach einer bestimmten Vorschrift eine Dringlichkeitsziffer zugewiesen, anhand derer über die Bearbeitungsreihenfolge entschieden wird (vgl. FANDEL ET AL. 2011, S. 759). Meist wird dabei nur eines der produktionslogistischen Ziele erreicht. Die Kombination von Prioritätsregeln verbessert diesen Sachverhalt, löst das Dilemma der Ablaufplanung aber nicht vollständig (vgl. FANDEL ET AL. 2011, S. 764). Während auf Maschinenebene die Auswirkungen einer Prioritätsregel auf den Auftragsdurchlauf abgeschätzt werden kann, ist dies in der betrieblichen Praxis nicht mehr möglich (vgl. GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 225ff.). Dies ist durch die mehrstufige Produktion in mehreren Werkstätten und zufälligen Auftragsankünften, bedingt durch ungerichtete Materialflüsse, begründet. Zur Konfiguration der

Prioritätsregeln werden daher Simulationsuntersuchungen durchgeführt (vgl. GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 225ff.). Eine Übersicht der verbreitetsten Prioritätsregeln gibt LÖDDING (2008, S. 443ff.).

### 1.2.3 Systeme der PPS

Die Gesamtheit aller Funktionen und Werkzeuge zur Produktionsplanung und -steuerung wird als PPS-System bezeichnet (WIENDAHL ET AL. 2005), was teilweise auch deren Realisierung durch Softwaresysteme umfasst (SCHÖNSLEBEN 2001, S. 15). Sie wirken als zentrale Ordnungsinstanz, die nach WIENDAHL ET AL. (2005) „die Ausbringung und die logistische Leistung eines Unternehmens mit den Marktanforderungen abgleicht“. In der Praxis wird anhand des Planungshorizonts zwischen Enterprise Resource Planning (ERP)-Systemen, Manufacturing-Execution-Systemen (MES) oder Advanced-Planning-and-Scheduling (APS)-Systemen unterschieden (s. Abb. 1.4).

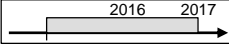
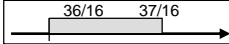
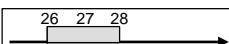
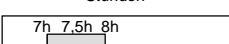
Planungsebenen	IT-Systeme	Zeithorizont	Funktionen
Absatz- und Programmplanung	ERP	Monate/Jahre 	Vorschau, Gruppierung, langfristige Entscheidungshilfe
Produktionsplanung	PPS	Wochen/Monate 	Geplante Endtermine pro Auftrag, Materialbedarfe, Produkt- und Maschinenzuordnung
Feinplanung	APS	Tage 	Komplette Zuordnung von Material, detaillierte Reihenfolgeplanung, regelbasierte Optimierung
Werkstattsteuerung	MES	Stunden 	Kurzfristige Planungsänderungen, Änderungen von Zuordnungen und Reihenfolge

Abb. 1.4: Planungshorizonte von ERP/PPS, APS und MES (in Anlehnung an MARCZINSKI 2008)

### Enterprise Resource Planning

ERP-Systeme dienen der Verwaltung aller Informationen, die zur Durchführung der Geschäftsprozesse in unterschiedlichen Unternehmensbereichen benötigt werden (GRONAU 2014, S. 4; CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 593). Wesentliche Merkmale sind die Integration von verschiedenen Aufgaben, Funktionen und Daten in einem Informationssystem (GRONAU 2014, S. 5) sowie die bereichsübergreifende Pflege und Nutzung von Daten auf einer gemeinsamen Datenbasis (CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 593).

Die PPS ist dabei als eines von vielen Modulen im ERP-System integriert, in dem der Stammdatenhaltung, z. B. von Stücklisten, Arbeitsplänen oder Kapazitäten, eine hohe Bedeutung zukommt (GRONAU 2014, S. 104ff.). Der Anwendungsbereich der PPS in ERP-Systemen zielt vor allem auf die lang- bis mittelfristige Planung ab und basiert meist auf dem MRP II-Konzept (GRONAU 2014, S. 117). ERP-Systeme liefern somit Planungsvorgaben, die von der Produktionssteuerung umzusetzen sind, enthalten im Regelfall aber keine eigenständigen Steuerungsmechanismen (vgl. KURBEL 2005, S. 263).

### **Manufacturing Execution System**

Unter dem Begriff *Manufacturing Execution System* entwickelten sich spezialisierte Systeme zur Fertigungssteuerung, die eigenständig oder als Add-On-Lösung für ERP-Systeme eingesetzt werden (vgl. KURBEL 2005; SCHUH & LASSEN 2006; VDI-RICHTLINIE 5600-1 2007). Die Schwerpunkte von MES liegen in der zeitnahen Planung und Steuerung der Fertigungsprozesse sowie der transparenten Abbildung des aktuellen Material- und Informationsflusses (VDI-RICHTLINIE 5600-1 2007). Neben dem prognostischen zeitlichen Aspekt der Produktionsfeinplanung und dem aktuellen Aspekt der Produktionssteuerung umfassen MES auch den historischen Aspekt der Produktionsprozessauswertung bzw. -bewertung (VDI-RICHTLINIE 5600-1 2007).

Neben Funktionalitäten für die operative Qualitätssicherung und Personaldisposition verfügen MES somit über Funktionen zur Fertigungsüberwachung und -steuerung, von denen die wichtigste der Fertigungsleitstand ist (KLETTI 2006, S. 31ff.). Über diesen wird der aktuelle Status aller Aufträge, die sich in der Fertigung befinden, grafisch visualisiert sowie Reihenfolgen und Konflikte dargestellt (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 211f.). Auf diese Weise wird die Kapazitätsplanung sowie die Maschinenbelegung vereinfacht, was im Gegensatz zur initialen Belegungsplanung weitgehend manuell durch den Fertigungsplaner erfolgt (vgl. SCHÖNSLEBEN 2011, S. 742ff.). Eine Übersicht über aktuelle Softwarelösungen für MES gibt DENGLER (2014, S. 9ff.), wobei der Bereich der Werkstattfertigung bisher kaum abgedeckt ist.

### **Advanced Planning and Scheduling**

Motiviert durch die zunehmende Informationsverfügbarkeit entlang der Wertschöpfungskette entstanden unter dem Begriff *Advanced Planning and Scheduling* Softwaresysteme, mit denen die Optimierung von Logistiksystemen über die gesamte Wertschöpfungskette ermöglicht wird (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 330). Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der mittel- und kurzfristigen Planung (VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 219). Die PPS, deren vorrangige Aufgabe die Erstellung detaillierter Terminpläne ist, deckt dabei nur einen Teil der Gesamtfunktionalitäten ab, der auch als Production Planning oder Detailed Scheduling bezeichnet wird (vgl. GÜNTHER & TEMPELMEIER



2005, S. 331ff.). Zur Erstellung der Produktionspläne nutzen APS-Systeme Optimierungsverfahren, meist Heuristiken wie z. B. Genetische Algorithmen (vgl. HANSMANN 2006, S. 385; VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 219; GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 334; KILLISCH-HORN 2009, S. 16). Wie in MES erfolgt die wiederkehrende Aktualisierung des Produktionsplans manuell durch den Anwender (vgl. STADTLER 2015, S. 199; GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 334). Die Intervalle, in denen ein vom APS-System erzeugter Produktionsplan gültig ist, variieren in Abhängigkeit vom Anwendungsfall zwischen einem Tag und mehreren Wochen (STADTLER 2015, S. 195). Da jede Neuplanung in sog. Planungsnervosität<sup>6</sup> resultiert, z. B. durch stetige Änderungen von Startterminen und Auftragsmengen, werden die kurzfristig anstehenden Aufträge in der Regel von einer Neuberechnung ausgeschlossen. Einen Marktüberblick über APS-Systeme gibt SCHMID (2006), für weitere Ausführungen sei zudem auf BETGE (2006) verwiesen.

### 1.2.4 Betriebsdaten und deren Erfassung

Eine realitätsnahe Produktionssteuerung erfordert die vollständige und rechtzeitige Rückmeldung aller „*relevanten Betriebsdaten des Fertigungsprozesses*“ (HANSMANN 2006, S. 375). Auf diese Weise wird die Ist-Situation der Fertigung zur Steuerungsebene rückgekoppelt (HANSMANN 2006, S. 375). Als Betriebsdaten sind die Daten definiert, „*die das Verhalten und den Zustand (Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft) eines Betriebs kennzeichnen*“ (VDI ET AL. 1983, S. 125; vgl. ROSCHMANN & JUNGHANNS 1993, S. 7). Eine Beschreibung der für die PPS relevanten Arten von Betriebsdaten geben SCHEER (1997, S. 343f.) und KURBEL (2005, S. 298ff.). Im Kontext dieser Arbeit sind auftrags- und maschinenbezogene Daten von Relevanz. Während auftragsbezogene Daten der Fortschrittskontrolle der Fertigung dienen (z. B. Start und Ende eines Arbeitsganges), geben maschinenbezogene Daten (z. B. Daten zu Störungen) Auskunft über die Kapazitäten (KURBEL 2005, S. 299).

Alle „*Maßnahmen, die erforderlich sind, um Betriebsdaten in verarbeitungsfähiger Form für den Ort der Verarbeitung sicherzustellen*“ werden nach VDI ET AL. (1983, S. 125) als Betriebsdatenerfassung (BDE) bezeichnet. Die BDE ist entweder als Modul von MES in der Funktionsgruppe Fertigung (vgl. Abschnitt 1.2.3) oder als eigenständiges System (sog. BDE-System) umgesetzt (vgl. KLETTI 2006, S. 31f.). Eine automatische Erfassung der Daten über die Produktionsanlage wird auch als Maschinendatenerfassung (MDE) bezeichnet (KURBEL 2005, S. 298).

<sup>6</sup> Der Begriff Planungsnervosität bezeichnet das wiederholte Anpassen der Planvorgaben an variierende Produktionsbedingungen, was zum Teil häufiger geschieht, als die Vorgaben realisiert werden können (vgl. ZELEWSKI 1991, S. 254).

Gängiges Medium der BDE sind Belege (z. B. Lohn- oder Rückmeldescheine), die manuell ausgefüllt und später in das ERP-System eingegeben werden (WIENDAHL 2010, S. 328). Aufgrund des hohen Erfassungsaufwands sowie des zeitlichen Verzugs werden zunehmend elektronische BDE-Technologien genutzt, bei denen der Auftrag am Arbeitsplatz identifiziert und mit automatisch (z. B. über MDE) oder manuell (z. B. über BDE-Terminals) erfassten Kontextinformationen ergänzt wird (SCHUH ET AL. 2015). Zur Datenübertragung gewinnt die Radio Frequency Identification (RFID)-Technologie zunehmend an Bedeutung (KURBEL 2005, S. 305; MARTIN 2014, S. 505ff.), da sie eine direkte Kommunikation zwischen Maschinen bzw. Aufträgen und Maschinen ermöglicht (vgl. KERN 2007, S. 2).

Eine simultane Fertigungssteuerung erfordert die Übermittlung der Daten zeitnah (VDI ET AL. 1983, S. 138f.; EVERSHEIM 1996, S. 151; WIENDAHL ET AL. 2005) bzw. in Echtzeit (KLETTI 2006, S. 251). Letztere ist in Anlehnung an DIN 44300-1 (1988)<sup>7</sup> als garantierte Verfügbarkeit von Ergebnissen der Datenverarbeitung innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne definiert (vgl. auch BÖGE 1998, S. 102). Die Ergebnisse werden somit rechtzeitig ausgegeben und es kann spontan auf zufällige Ereignisse reagiert werden (vgl. WÖRN & BRINKSCHULTE 2005, S. 1).

### 1.3 Problemstellung

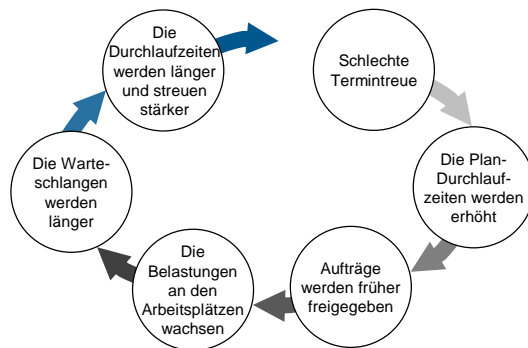
Die in Abschnitt 1.1 beschriebene niedrige Logistikleistung der Werkstattfertigung beruht auf steuerungsrelevanten Defiziten, die sich aus den in Abschnitt 1.2.1 beschriebenen Eigenschaften der Werkstattfertigung ergeben. Vor allem die Erfüllung der kundenseitig relevanten Zielgrößen Lieferzeit und Liefertreue sind nach ALTHALER ET AL. (2008) wenig zufriedenstellend. Fast die Hälfte aller im Rahmen dieser Arbeit befragten werkstattfertigen Unternehmen (s. Anhang A) haben eine Liefertreue von unter 90 %, zudem sind die Durchlaufzeiten dort deutlich länger als bei Unternehmen, die nach dem Gruppen oder Fließprinzip produzieren. Aufgrund der hohen Steuerungskomplexität der Werkstattfertigung sowie der Steuerungsunschärfe sind die Ursachen dieser Probleme in der PPS zu verorten. Dabei sind insbesondere die im Folgenden beschriebenen Aspekte der fehlenden Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufs, der ungeeigneten Reaktion auf Störungen und Planabweichungen sowie der hohe Zeitverzug in der Rückmeldung von Betriebsdaten ursächlich.

---

<sup>7</sup> Die DIN-Norm 44300-1 wurde 2001 ersatzlos zurückgezogen.

### Fehlende Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufs

Varianzen in den Bearbeitungszeiten werden durch Bestände abgedeckt (KIENER ET AL. 2012, S. 266f.). Daraus resultieren im Mittel lange Durchlaufzeiten, die zudem sehr stark variieren (vgl. KINGSMAN ET AL. 1989). Da sich die Durchlaufzeit eines Auftrags so nur schwer prognostizieren lässt, ist die Einhaltung vereinbarter Liefertermine nicht gewährleistet (ADAM 1993, S. 17; SCHUH ET AL. 2013). Die PPS-seitigen Reaktionen darauf werden als Mythen der Produktionssteuerung bezeichnet (PLOSSL 1973, S. 6f.) und sind im Fehlerkreis der Produktionssteuerung (KETTNER & JENDRALSKI 1979; s. Abb. 1.5) zusammengefasst. ZÄPFEL & MISSBAUER (1988) definieren dies als *Durchlaufzeitsyndrom* und ergänzen den Fehlerkreis um kurzfristige Änderungen (z. B. eintreffende Fehlteile), die sich verstärkt auf die Belastung der Arbeitsplätze auswirken. Eine Studie unter Unternehmen der Einzel- und Kleinserienproduktion zeigte nach drei Tagen nur noch eine Übereinstimmung von 25 % zwischen dem geplanten Produktionsablauf und der realen Fertigung (SCHUH ET AL. 2013).



**Abb. 1.5:** Fehlerkreis der Produktionssteuerung (WIENDAHL 2010, S. 253 nach KETTNER & JENDRALSKI 1979)

Ein Defizit heutiger PPS-Systeme für die Werkstattfertigung sind somit die fehlende Prognostizierbarkeit des Auftragsdurchlaufs durch die Fertigung, um realistische Liefertermine zu vereinbaren und diese auch einhalten zu können.

### Ungeignete Reaktion auf Störungen und Planabweichungen

Verschiedene unvorhersehbare Ereignisse verhindern in der Werkstattfertigung die Umsetzung eines vorhandenen Produktionsplans. Zum einen werden durch den Kunden kurzfristig Änderungen in Bezug auf das Produkt oder den Liefertermin angestoßen (vgl. WIENDAHL ET AL. 2005). Zum anderen erzeugen unvorhersehbare Ereignisse (z. B. Maschinenstörungen), Abweichungen, die sich auf nachgelagerte Prozesse übertragen und so für permanent auftretende

Unregelmäßigkeiten und Unruhe im Produktionsablauf sorgen (vgl. TÖNSHOFF & GLÖCKNER 1992; WELLER 2002, S. 25; SCHUH ET AL. 2007). Darüber hinaus weichen die Werker von der vorgegebenen Auftragsreihenfolge ab, indem sie eine zufällige Reihenfolge (z. B. anhand gestapelter Werkstückbehälter) wählen (KLAUS ET AL. 2007, S. 117) oder sich aufgrund fehlenden Vertrauens bewusst gegen die vom IT-System vorgegebene Reihenfolge entscheiden (vgl. SCHUH ET AL. 2014b, S. 294). Nach MOHR (1987, S. 7f.) ist nach fünf Tagen kein Parameter (z. B. Fertigungsreihenfolgen auf einzelnen Arbeitsplätzen) der ursprünglichen Produktionsplanung mehr gültig.

Mit sinkenden Übergangszeiten (z. B. um kürzere Lieferzeiten zu realisieren) wirken sich lokale Störungen stärker auf den weiteren Produktionsverlauf aus. Dies führt zu weiteren Umplanungen zwischen den regelmäßigen Planungsläufen, sodass eine hohe bis kontinuierliche Planungsintensität erforderlich ist (MERTINS ET AL. 1992, S. 17). Die Reaktion auf Störungen erfolgt hingegen weitgehend ohne Systemunterstützung (s. Anhang A). Steuerungsentscheidungen werden lokal am Arbeitssystem auf Basis der dort wartenden Aufträge und anhand einfacher Prioritätsregeln getroffen (s. Abschnitt 1.2.2.2). Auf diese Weise können die Einflüsse auf nachfolgende Arbeitssysteme nicht berücksichtigt werden (vgl. BECKER ET AL. 1998, S. 74f.). Dies führt zu weiteren, nicht vorhersehbaren Steuerungseingriffen. Bereits kleine Reaktionen können zu weitreichenden Konflikten im weiteren Auftragsdurchlauf führen (vgl. SCHUH ET AL. 2013). Alternativ eingesetzte Feinplanungssysteme, mit denen der Produktionsplan unter Berücksichtigung der eingetretenen Ereignisse neu erstellt wird, tendieren dazu, ständig neu zu planen, was wiederum zu internen Turbulenzen und damit verbundenen Unsicherheiten bei den beteiligten Mitarbeitern führt (SCHUH ET AL. 2014b, S. 285).

### **Hoher Zeitverzug in der Rückmeldung von Betriebsdaten**

Durch das Werkstattlayout und die individuellen, ungerichteten Materialflüsse ist es ohne Systemunterstützung nicht möglich, anhand der aktuellen Position eines Auftrags einen Rückschluss auf dessen Fertigungsfortschritt sowie den weiteren Verlauf zu ziehen (vgl. SCHNEIDER ET AL. 2013). In der Praxis wird daher jeder Prozessschritt eines Fertigungsauftrags nach dessen Ende durch den Mitarbeiter zurückgemeldet. Obwohl technologische Unterstützung (z. B. durch Handscanner oder BDE-Terminals) in der Regel genutzt wird,<sup>8</sup> sind die Rückmeldung sehr unzuverlässig und mit hohem Zeitversatz behaftet (HUANG ET AL. 2007; SCHNEIDER ET AL. 2013; SCHUH ET AL. 2015). Eine automatisierte Datenerfassung verbessert die Situation nur in geringem Maße, da die Aufträge

---

<sup>8</sup> Nach SCHUH & STICH (2013, S. 44) wird die Rückmeldung in 57 % der KMU in schriftlicher Form durchgeführt, die Verwendung elektronischer Rückmeldeterminals nimmt jedoch stetig zu (vgl. dazu auch KURBEL 2005, S. 298; SCHUH ET AL. 2015).

nur zum Zeitpunkt der Erfassung (z. B. bei Bearbeitungsbeginn und -ende) eine Rückmeldung erzeugen. Der Ort und Status des Auftrags vor und nach der automatischen Erfassung bleibt weiter intransparent, was bei einer Liegezeit von ca. 80 % der Durchlaufzeit (DLZ) einen Großteil der Zeit ausmacht, die der Auftrag in der Fertigung verbringt (vgl. SCHNEIDER ET AL. 2013). 72 % der im Rahmen dieser Arbeit befragten Werkstattfertiger können den Standort ihrer Aufträge nur tagesgenau angeben (s. Anhang A). Störungsbedingte Änderungen in der realen Fertigung sorgen in Kombination mit fehlenden Erfassungsmöglichkeiten für eine Diskrepanz zwischen realem und geplantem Produktionsablauf (vgl. auch ALTHALER ET AL. 2008). Heutige Systeme sind zu träge, um den Fertigungsablauf vollständig und aktuell zu erfassen, was eine der Hauptursachen für die niedrige logistische Leistungsfähigkeit der Werkstattfertigung darstellt (STRACK 1987, S. 27f.; SCHNEIDER ET AL. 2013).

Zusammenfassend existieren Defizite in der fehlenden Prognostizierbarkeit des Auftragsdurchlaufs, in ungeeigneten Reaktionsmöglichkeiten auf unvorhergesehene Ereignisse im Auftragsdurchlauf sowie in der echtzeitnahen Betriebsdatenerfassung. Die geringe Verbreitung von IT-gestützten Steuerungssystemen in der Praxis, wie es z. B. die Studie von SCHUH & WESTKÄMPER (2006, S. 8) zeigt und die in Anhang A beschriebenen eigenen Ergebnisse bestätigen, lassen darauf schließen, dass marktseitig keine Software für die anforderungsgerechte Steuerung manueller Werkstattfertigungen existiert (vgl. auch KÖBERNIK 1999, S. 42).

## **1.4 Zielsetzung**

### **1.4.1 Ziel der Arbeit**

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit in der Werkstattfertigung, insbesondere durch die Verbesserung der Termintreue und Prognostizierbarkeit des Fertigungsverlaufs. Leistungsfähige Produktionsprozesse lassen sich entweder durch die Gestaltung von stabilen, reproduzierbaren Prozessen oder durch die zielgerichtete Reaktion auf Abweichungen realisieren (SCHUH ET AL. 2007). In der Werkstattfertigung verhindern unvorhersehbare Ereignisse die Realisierung stabiler, reproduzierbarer Prozesse. Daher liegt der Schwerpunkt in der Reaktion auf Störungen, deren größte Herausforderung das Erreichen kurzer Reaktionszeiten ist. Das Arbeitsergebnis lässt sich somit als ein System zur fertigungsbegleitenden Produktionssteuerung in Werkstätten zur kurzfristigen Reaktion auf Störungen unter Betrachtung der globalen Auswirkungen zusammenfassen.

Die Überwindung bestehender Defizite erfordert dabei folgende Eigenschaften:

- Echtzeitnahe Erfassung der Ist-Situation auf Steuerungsebene.

- Vorhersehbarkeit der Auswirkungen unvorhergesehene Ereignisse auf den Produktionsverlauf.
- Adaptive<sup>9</sup> Reaktion in Bezug auf Planabweichungen.
- Einbeziehung der Auswirkungen auf andere Bereiche bei Steuerungsentscheidungen.

Das zu entwickelnde System wird durch Elemente beschrieben, die innerhalb der existierenden Systemwelt zur PPS zu implementieren sind. Es ist somit kein Konkurrenzsystem, sondern besteht aus Bausteinen, die bestehende oder neuartige MES oder APS-Systeme ergänzen und auf einem vorhandenen ERP-System aufbauen.

### 1.4.2 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Um den Gültigkeitsbereich der Lösung im Vorfeld einzugrenzen und so eine zielgerichtete Untersuchung des Stands der Technik zu ermöglichen, erfolgt auf Basis des in Abschnitt 1.2 aufgespannten Betrachtungsraums eine weitere Konkretisierung der Zielsetzung und Rahmenbedingungen.

Das Anwendungsfeld beschränkt sich auf die kurzfristige Produktionssteuerung zur Durchsetzung eines vorgelagert geplanten Produktionsprogramms inklusive der vorgesehenen Termine. Die Erstellung des Produktionsplans und die dafür erforderlichen Randbedingungen sind daher kein Bestandteil dieser Arbeit.

Die für die Beschreibung der technischen Auftragsabwicklung relevanten Ausprägungen leiten sich aus dem morphologischen Merkmalschema der betrieblichen Erscheinungsformen zur Auftragsabwicklung (SCHOMBURG 1980, S. 87ff.; SAMES & BÜDENBENDER 1998) sowie den PPS-Betriebstypen von GLASER ET AL. (1992, S. 409ff.) ab. Der Betrachtungsraum dieser Arbeit entspricht PPS-Betriebstyp I. Unternehmen dieses Typs fertigen im Kundenauftrag hochindividuelle, stark kundenbezogene Produkte. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Teilefertigung, sodass die betrachteten Erzeugnisse als geringteilig anzunehmen sind. Die Beschränkung hinsichtlich der Fertigungsart auf eine Einmalfertigung bzw. Einzel- und Kleinserienfertigung sowie der Ablaufart auf die Werkstattfertigung ist aus den vorangegangenen Ausführungen gegeben.

---

<sup>9</sup> Adaptivität bezeichnet in Anlehnung an ALLWEYER & SCHEER (1995, S. 5), BÖGE (1998, S. 8) und GÖHRING & LORENZ (2010, S. 304) die Fähigkeit eines Systems, während des laufenden Betriebes Abweichungen vom geplanten Ablauf frühzeitig zu erkennen und selbstständig notwendige Änderungen abzuleiten und auszuführen.

Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung treten gelegentlich bis häufig auf, da z. B. kurzfristige Konstruktions- oder Lieferterminänderungen als typische Störgrößen anzusehend sind (vgl. WIENDAHL ET AL. 2005).

Nach GLASER ET AL. (1992, S. 434) zeichnet der PPS-Betriebstyp I folgende Rahmenbedingungen aus:

- Unregelmäßige bzw. stochastische Auftragseingänge.
- Wechselnde Arbeitssystemfolgen sowie Inanspruchnahme unterschiedlicher Arbeitssysteme zwischen den verschiedenen Aufträgen.
- Ungleichmäßige Kapazitätsauslastung.
- Erhebliche Streuung der Arbeitsgang- und Auftragsdurchlaufzeiten.
- Hohe Unsicherheit bzgl. der Planungsdaten.

Divergente (z. B. Ablängen von Halbzeugen) und konvergente Materialflüsse (z. B. Verschweißen zweier Bauteile) (vgl. JODLBAUER 2008, S. 10) werden aufgrund der o. g. geringteiligen Erzeugnisstruktur nicht betrachtet. Deren Auftreten darf hingegen kein Ausschlusskriterium für die Eignung der in dieser Arbeit entwickelten Lösung sein.

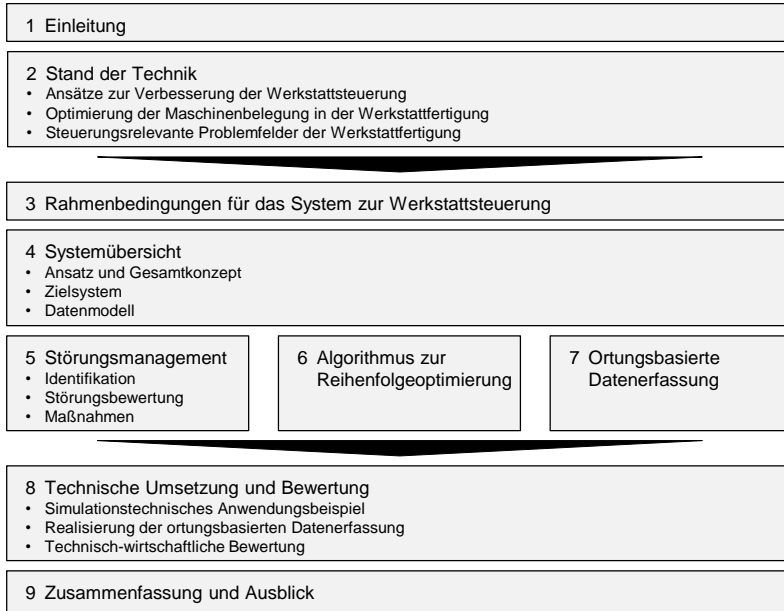
Da bei der Implementierung eines Systems zur PPS davon auszugehen ist, dass die Hardware sowie die IT-Architektur die Geschwindigkeitsanforderungen bestmöglich nach dem Stand der Technik erfüllt, werden diese Aspekte im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

## **1.5 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel untergliedert, deren Struktur in Abb. 1.6 dargestellt ist. In diesem Kapitel wurde die Ausgangssituation und Motivation dargestellt sowie nach einer thematischen Einordnung die Problemstellung herausgearbeitet. Zudem erfolgten die Beschreibung der Zielsetzung und die Spezifizierung des Untersuchungsbereichs.

Kapitel 2 umfasst den Stand der Technik. Neben Ansätzen und Systemen zur Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme (Abschnitt 2.1) werden auch Ansätze des Operation Research zur Optimierung von Maschinenbelegungsplänen betrachtet (Abschnitt 2.2). Des Weiteren werden Arbeiten zu steuerungsrelevanten Problemfeldern in Bezug auf die Werkstattfertigung beleuchtet (Abschnitt 2.3). Abschließend erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfes.

Für das in dieser Arbeit zu entwickelnde Steuerungssystem werden in Kapitel 3 Anforderungen und Annahmen aufgestellt. Die Beschreibung des Steuerungsansatzes, des Zielsystems und des Datenmodells erfolgt in Kapitel 4. Darauf



**Abb. 1.6:** Struktur der Arbeit

aufbauend wird in den nachfolgenden Kapiteln das System detailliert. Das Störungsmanagement (Kapitel 5) umfasst die Störungsidifikation anhand einer neuartigen Klassifizierung, die Störungsbewertung und störungsklassenabhängige Steuerungsmaßnahmen. Im Falle einer Neuberechnung des zugrundeliegenden Belegungsplans wird zudem ein neuartiger Algorithmus, der in Kapitel 6 beschrieben ist, angewendet. Die ortungsbasierte Betriebsdatenerfassung ist in Kapitel 7 beschrieben.

Abschließend wird durch eine prototypische Umsetzung der Funktionsnachweis der Lösung erbracht (Kapitel 8). Während das entwickelte Werkstattsteuersystem in Form einer Ablaufsimulation erprobt wird, erfolgt die Realisierung der ortungsbasierte Datenerfassung als Laboraufbau. Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgt die technisch-wirtschaftliche Bewertung. Abschließend sind in Kapitel 9 die Inhalte dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungsaktivitäten gegeben.



## 2 Stand der Technik

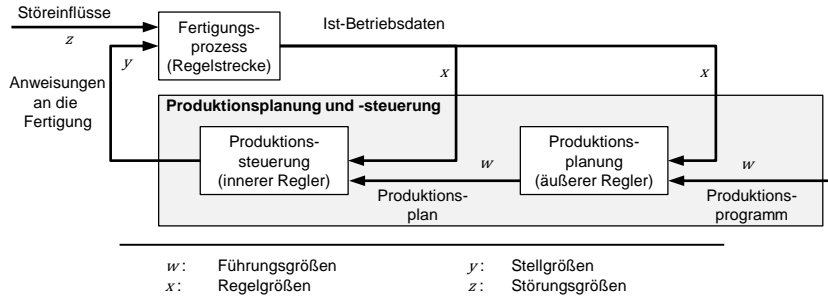
Dieses Kapitel umfasst den Stand der Technik und Forschung in Bezug auf die Zielstellung dieser Arbeit. Ansätze, die sich mit der Verbesserung der Produktionssteuerung im Allgemeinen sowie der Werkstattsteuerung im Speziellen beschäftigen, sind in Abschnitt 2.1 systematisiert und beschrieben. Zudem werden Ausprägungen und Lösungsalgorithmen zum Job Shop Scheduling Problem als entsprechendes Optimierungsproblem des Operations Research zu Maschinenbelegungsplänen aufgeführt (Abschnitt 2.2). Darüber hinaus wird in Abschnitt 2.3 der Stand der Forschung zu steuerungsrelevanten Problemfeldern der Werkstattfertigung beleuchtet, die im Gegensatz zu den Arbeiten aus Abschnitt 2.1 Einzelaspekte fokussieren. Dies sind die Störungsidentifikation und Maßnahmenauswahl (Abschnitt 2.3.1), die Bewertung von alternativen Steuerungsentscheidungen (Abschnitt 2.3.2) sowie die echtzeitnahe Datenerfassung und -bereitstellung (Abschnitt 2.3.3). Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Ableitung des Handlungsbedarfs zur Erhöhung der Termintreue und Planungssicherheit in der Werkstattfertigung.

### 2.1 Ansätze zur Verbesserung der Werkstattsteuerung

#### 2.1.1 Ansätze der Produktionsregelung

Zur Gliederung der einzelnen Entwicklungsrichtungen wird das Modell der Produktionsregelung, bei dem die Produktionssteuerung als Regelkreis betrachtet wird (vgl. DROSCHA 1965; NISSING & VIRNICH 1982, S. 11; STRACK 1987, S. 10ff.; HACKSTEIN 1988, S. 29ff.; WARNECKE 1989; WIENDAHL ET AL. 1993a, b; PRITSCHOW & WIENDAHL 1995; WIENDAHL 2010, S. 346ff.), herangezogen. Dabei fungiert der Fertigungsprozess als Regelstrecke und die Produktionssteuerung als Regler (s. Abb. 2.1). Im Vergleich zu einer Steuerung weist eine Regelung eine Rückkopplung der Regelgröße auf die Beeinflussung der Eingangsgröße auf (vgl. DIN IEC 60050-351 2014). Aufgrund der Sicherungsfunktion (s. Abschnitt 1.2.2.1) ist die Rückkopplung stets Bestandteil der Produktionssteuerung (ARPING 1977, S. 13), auch wenn diese nur durch einfache Monitoring- oder Diagnosesysteme ausgeprägt ist (vgl. PETERMANN 1996, S. 8). Somit werden die Begriffe Produktionssteuerung und -regelung in dieser Arbeit synonym verwendet.

Die Produktionssteuerung regelt somit die Führungsgröße  $w$  unter Einfluss der Störgröße  $z$ . Die Regelgröße  $x$  wird durch die zurückgemeldeten Betriebsdaten



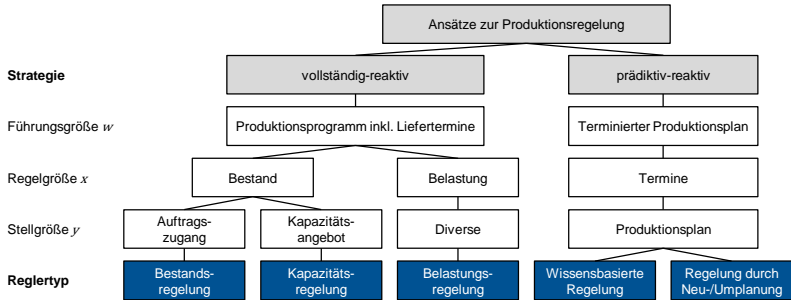
**Abb. 2.1:** Regelkreis der PPS (in Anlehnung an ARPING 1977, S. 3 und HACKSTEIN 1988, S. 34)

gebildet, während sich die Stellgröße  $y$  als Anweisungen oder Vorgaben an die Fertigung ausprägt (vgl. ARPING 1977, S. 13f.). Die Erfassung und Nutzung der Betriebsdaten erfolgt dabei kontinuierlich, um Störungen der Zielerreichung durch entsprechende Maßnahmen auszuregulieren (vgl. ZETLMAYER 1994, S. 37). Ein geschlossener Informationsfluss ist dabei nicht zwingend notwendig, sondern kann durch den Menschen als letzte Entscheidungsinstanz im Regelkreis unterbrochen werden (offener Regelkreis, vgl. MILBERG ET AL. 1992). Dabei folgt die Produktionsregelung dem kybernetischen<sup>10</sup> Managementansatz, bei dem aus der Analogie zwischen dem Regelkreis und der Produktion zwar Grundsätze abgeleitet werden, jedoch keine regelungstechnische Auslegung erfolgt (WARNECKE 1989).<sup>11</sup> Darüber hinaus ist die Reaktion auf Störungen sowie die Vorgabe von Zielwerten Bestandteil der Produktionsregelung (vgl. ZETLMAYER 1994, S. 21; REINHART & SIMON 1995).

Die im Folgenden vorgestellten Forschungsarbeiten unterscheiden sich hinsichtlich der Ausprägung einzelner Regelkreiselemente, insbesondere der Regelgröße  $x$ , der Stellgröße  $y$  sowie der Auslegung des Reglers und sind in Abb. 2.2 zusammengefasst. Die hier vorgenommene Einordnung dient dazu, die Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zu systematisieren. Im Anschluss werden einzelne Ansätze der Produktionssteuerung vorgestellt, die sich nicht in diese Systematik einordnen lassen.

<sup>10</sup> Kybernetik bezieht sich im Gegensatz zur Regelung auch auf nichttechnische Systeme und ist nach REINISCH (1974, S. 29) definiert als „die Wissenschaft von der Steuerung, d. h. der zielgerichteten Beeinflussung von Systemen sowie der (geistigen) Informationsverarbeitungsprozesse und deren Automatisierung, die das wesentliche der Steuerungsvorgänge ausmachen.“

<sup>11</sup> Auf eine weitere regelungstechnische Betrachtung wird in dieser Arbeit verzichtet. Hierzu sei auf REMPP (2003, S. 35ff.) verwiesen.



**Abb. 2.2:** Gliederung der Ansätze zur Produktionsregelung

Eine grundlegende Unterscheidung erfolgt nach der Führungsgröße  $w$ . Wird diese durch das Produktionsprogramm inklusive der Liefertermine gebildet, sind die entsprechenden Ansätze der *vollständig-reaktiven*<sup>12</sup> Ablaufplanung zuzuordnen, da sie ihre Steuerungsentscheidungen erst während des Auftragsdurchlaufs durch die Fertigung treffen (SCHWARTZ 2004, S. 48). Dagegen werden Ansätze, deren Führungsgröße durch einen terminierten Produktionsplan gebildet wird, als *prädiktiv-reaktive* Regelung bezeichnet,<sup>13</sup> da stets der weitere Verlauf vorausgeplant wird. Der Produktionsplan wird durch die Regelung angepasst und dient gleichzeitig als Stellgröße  $y$ . In Anlehnung an das Rahmenwerk von VIEIRA ET AL. (2003) werden diese beiden Regelungsausprägungen als Steuerungsstrategien bezeichnet.

Die Ansätze der vollständig-reaktiven Ablaufplanung unterscheiden sich vor allem durch die Stellgröße  $y$  und der damit verbundenen Auslegung des Reglers. Die Regelgröße  $x$  ist dabei meist der Bestand, der entweder durch die Stellgröße Auftragszugang oder die Kapazität geregelt wird. Regler mit höherer Komplexität, die neben dem Bestand über weitere Regel- und Stellgrößen verfügen, werden als belastungsregelnde Ansätze zusammengefasst.

Aufgrund der vielfältigen Ausprägungen wird bei den prädiktiv-reaktiven Regelungstypen nur hinsichtlich der Reglerauslegung unterschieden. Dies sind entweder wissensbasierte Umplanungsmaßnahmen oder die vollständige Um- bzw. Neuplanung des zugrundeliegenden Produktionsplans. In Anlehnung an VIEIRA ET AL. (2003) werden diese Ausprägungen auch als Steuerungsmethoden bezeichnet.

<sup>12</sup> Engl. complete reactive approaches bzw. reactive scheduling (vgl. SCHWARTZ 2004, S. 48).

<sup>13</sup> Engl. predictive/reactive scheduling bzw. rescheduling, teilw. auch reactive scheduling (vgl. SCHWARTZ 2004, S. 48).

Außerhalb der in Abb. 2.2 dargestellten Systematik wird zudem nach dem Ort der Entscheidung zwischen zentralen und dezentralen PPS-Systemen unterschieden (vgl. vgl. LÖDDING ET AL. 2003; CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 581. Zwischen diesen Ausprägungen ist das Konzept der hierarchischen PPS nach dem Modell hierarchisch strukturierter betrieblicher Systeme von RIEPER (1979) anzusiedeln. Die Steuerungsaufgabe wird dabei in Teilprobleme zerlegt und diese durch Regler in den verschiedenen Hierarchieebenen gelöst (vgl. KISTNER & STEVEN 1990, S. 302ff.; BLEY & JOSTOCK 1992; JOSTOCK & BLEY 1992; KISTNER 1993). Obwohl das Anwendungsgebiet vor allem die Produktionsplanung in der (Groß-)Serienfertigung (vgl. HAX & MEAL 1975; GRAVES 1982) umfasst, nehmen einige der im Folgenden vorgestellten Ansätze darauf Bezug.

### **Bestandsregelung**

Die als bestandsregelnde Ansätze einzuordnenden Verfahren setzen den Schwerpunkt bei der Begrenzung des Auftragszugangs in Abhängigkeit der Bestandsgröße in der Fertigung. Diesem Konzept liegt der Zusammenhang zugrunde, dass hohe Bestände längere Auftragsdurchlaufzeiten und demzufolge eine schlechtere Vorhersagbarkeit der Fertigstellungstermine verursachen (vgl. Abb. 1.5). Die Bestandsgröße wird dabei in der Regel anhand der Belastung gemessen, die der zeitlichen Kapazitätsbeanspruchung eines Auftrags bzw. Arbeitsvorgangs entspricht.

Der bekannteste zentrale Ansatz zur Bestandsregelung ist die auf den Arbeiten von IRASTORZA & DEANE (1974) und JENDRALSKI (1978) aufbauende *Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA)* von BECHTE (1980), die durch WIENDAHL (1987a, b) zur *Belastungsorientierten Fertigungssteuerung (BOS-F)* weiterentwickelt und durch KINGSMAN ET AL. (1989) sowie MOREIRA & ALVES (2009) um eine Regelung des Auftragszugangs erweitert wurde. Eine Zusammenfassung der zentralen bestandsregelnden Verfahren, mit denen in der industriellen Anwendung bereits deutliche Erfolge erreicht wurden (vgl. BERTRAND & WORTMANN 1981, S. 165ff.; vgl. BECHTE 1988), geben LAND & GAALMAN (1996), BREITHAUPT ET AL. (2002) und LAND (2004). Einen Sonderfall der zentralen bestandsregelnden Verfahren nimmt die Durchsatzregelung von REMPP (2003) ein, bei der nicht die Bestandsgröße sondern der Abgang als Regelgröße dient und der Auftragszugang an diese angepasst wird. Die Differenz zwischen Zu- und Abgang wird als Durchsatz bezeichnet.

Mit den oben aufgeführten Verfahren werden Bestände und Durchlaufzeiten kontrolliert, die Ergebniserreichung ist dagegen stark von der steuernden Person bzw. den gewählten Vorrangbedingungen abhängig. BUZACOTT & SHANTHIKUMAR (1992) und SURI (1998) regeln daher den Materialfluss zwischen Arbeitssystemen mit einer festen Anzahl Karten in Form selbststeuernder Regelkreise. Deren Auslegung erfordert ein vordefiniertes Produktprogramm,

sodass obgleich allgemeiner Eignung für die Werkstattsteuerung ein Einsatz bei hochindividuellen Produkten der Einzel- und Kleinserienfertigung aufgrund der mangelnden Auftragswiederholhäufigkeit nur bedingt möglich ist (vgl. LÖDDING 2001, S. 36).

Unabhängig vom Produktprogramm sind Ansätze, die den Zufluss zu einzelnen Arbeitssystemen regeln. Während sich die *Pull-from-Bottleneck (PFB)*-Strategie von HOPP & SPEARMAN (2001, S. 503f.) auf Engpassmaschinen konzentriert, begrenzen die Verfahren *Kapazitätsorientierte und Bestandsgeregelte Auftragsfreigabe (KOBRA)* von NITTKA (1996) und *Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung (DBF)* von LÖDDING (2001) den Zufluss zu sämtlichen überlasteten Arbeitssystemen und unterscheiden sich vornehmlich in den Bestandsschranken sowie der Art und Weise der Zuflussbegrenzung.

Alle o. g. Ansätze ermöglichen durch die Bestandsregelung eine Stabilisierung von Durchlaufzeiten. Da einzelne Aufträge nicht gezielt beschleunigt oder zurückgehalten werden können, ist eine zielgerichtete Steuerung auf einen Endtermin, insbesondere bei langen Durchlaufzeiten, nicht möglich.

### **Kapazitätsregelung**

Kapazitätsregelnde Ansätze ermöglichen die Abarbeitung erhöhter Auftragsbestände durch eine Anpassung der Kapazität an die aktuelle Belastung. Bei der Erweiterung der *Modellbasierten Produktionsregelung* (PETERMANN 1996) durch BREITHAUPT (2001) wird dies durch eine dezentrale Rückstandsregelung realisiert, die eine gezielte Regelung des Durchflusses an einzelnen Arbeitssystemen ermöglicht. Im Gegensatz dazu orientiert sich die Kapazitätsregelung im Ansatz von BEGEMANN (2005) an der Terminerreichung der Aufträge.

Generell erfordern kapazitätsregelnde Maßnahmen eine Kapazitätsflexibilität, die in der Praxis nicht immer gegeben ist. Aufgrund der zusätzlichen Regulierung von Engpässen ist eine höhere Termintreue gegenüber der reinen Bestandsregelung zu erwarten.

### **Belastungsregelung**

Methoden der vollständig-reaktiven Planung mit höherer Komplexität verfügen über weitere Regel- und Stellgrößen und sind im Rahmen dieser Betrachtung unter dem Begriff *Belastungsorientierte Produktionsregelung* zusammengefasst. Sie eint die Regelung der Belastung der Fertigung auf einem konstanten Niveau.

Die *Bestandsgeregelte Durchflusssteuerung (BGD)* von BUSCH (1987) kann als Erweiterung der o. g. Durchsatzregelung gesehen werden, da sie über lokale Maßnahmen verfügt (z. B. überlappende Fertigung, Kapazitätserhöhungen), um den Zufluss zu Engpasssystemen bei Bestandsunterschreitungen zu erhöhen. Dagegen basieren die Ansätze von MÄRTENS ET AL. (2007), KIENZLE

(2012) und REINHART ET AL. (2013) auf der DBF und erweitern diese um weitere Steuerungsparameter zur Reihenfolgebildung durch Änderung der Auftragsprioritäten sowie engpassbezogene Kapazitätsregelungen. Die Arbeit von ENGELHARDT (2015) lehnt sich ebenfalls an die DBF an und fokussiert die Steuerung konvergenter Materialflüsse (z. B. zeitgleiches Eintreffen gefertigter Komponenten am Montageplatz). Durch eine steuerungsorientierte Modularisierung der Arbeitssysteme wird der Einsatz von situationsabhängigen Reglern für Auftragsfreigabe, Reihenfolgeregelung und Kapazitätssteuerung ermöglicht. Die Modularisierung erfordert hingegen Ähnlichkeiten in den produktseitigen Abläufen. Im hierarchischen Ansatz von BRINZER (2005) erfolgt die Regelung der Produktionssysteme dezentral über die Reihenfolge und Kapazität anhand von Bestands- und Terminvorgaben, die von Reglern höherer Hierarchie festgelegt wurden.

Die belastungsregelnden Ansätze ermöglichen wesentlich mehr Steuerungsoptionen als die Bestands- oder Kapazitätsregelung. Allen vollständig-reaktiven Ansätzen ist gemein, dass keine exakte Terminierung des Durchlaufs und eine dementsprechende Abstimmung der zeitlichen, globalen Kapazitätsbelegung erfolgt.

### **Wissensbasierte Regelung**

Wissensbasierte Regelungsansätze, auch als wissensbasierte Systeme oder Expertensysteme bezeichnet (vgl. MÖNCH 2006, S. 30), nutzen einen vollständig terminierten Produktionsplan als Führungsgröße (prädiktiv-reaktive Regelung) und leiten regelbasiert Maßnahmen ab, die dabei häufig als offener Regelkreis gestaltet sind (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Der Ansatz von ARPING (1977) ermöglicht das ereignisorientierte, störungsbezogene Ergreifen von Reaktionsmaßnahmen, um insbesondere die Termineinhaltung innerhalb der damals langen Planungsperioden von mehreren Wochen zu verbessern. Die Arbeiten von ROSE (1989), BELZ & RINGLSTETTER (1991) und BELZ (1993) teilen darüber hinaus den Fertigungsprozess in Bereiche ein, für die jeweils eigene Diagnosekriterien entwickelt wurden. Dies ermöglicht die zielgerichtete Auswahl von Maßnahmen, über deren Anwendung der Nutzer entscheidet, wobei in den beiden jüngeren Ansätzen eine stärkere systemische Unterstützung existiert. Vordefinierte Maßnahmen verwendet auch das wissensbasierte Leitsystem von KUPEC (1991), deren Auswahl sich an der Stördauer orientiert. Dieses System ist dabei auf Flexible Fertigungssysteme (FFS)<sup>14</sup> beschränkt.

---

<sup>14</sup> Flexible Fertigungssysteme (FFS) sind „Produktionseinrichtungen zur automatisierten Bearbeitung eines variablen Teilespektrums in kleinen bis mittleren Losgrößen“ (SONNENSCHNEIN 1998, S. 3).

Im Gegensatz zu starr vordefinierten Regeln ermöglichen selbstlernende Systeme eine Erweiterung der Wissensbasis, indem sie das Ergebnis getroffener Maßnahmen bewerten und somit die Erfolgsquote erhöhen. Beispielhaft seien hier die Ansätze von WEINBRECHT (1993) sowie WIENDAHL ET AL. (1993a, b) genannt, bei denen mittels eines Fuzzy-Logik-basierten Reglers Maßnahmen ausgewählt, die dem Fertigungsplaner als Entscheidungsunterstützung dienen. Als weitere selbstlernende Ansätze zur Produktionsregelung seien hier die Systeme SONIA (COLLINOT & LE PAPE 1991; LE PAPE 1994) und CABINS (SYCARA & MIYASHITA 1994; MIYASHITA & SYCARA 1995) genannt.

Der Ansatz von JOSTOCK (1994, s. auch BLEY ET AL. 1995) nutzt eine hierarchische Architektur, bei denen die Regler selber Maßnahmen ergreifen oder diese an höhergelegene Hierarchieebenen delegieren können. Das System ist dabei auf eine Interaktion mit dem Benutzer ausgelegt und somit ein offener Regelkreis.

Die auf den Arbeiten von BURGER (1992, s. auch MILBERG & BURGER 1991; MILBERG ET AL. 1992) und ZETLMAYER (1994) aufbauende Produktionsregelung von MARTIN (1998) ermöglicht eine automatisierte Produktionsregelung in mehrstufigen und heterogenen Produktionssystemen. Die Steuerungsmaßnahmen werden dabei durch ein regelbasiertes Expertensystem automatisch ausgewählt.

### **Regelung durch Umplanung/Neuplanung**

Während die wissensbasierte Regelung ausschließlich durch eine regelbasierte, lokale Modifikation des Plans erfolgt, ist diese bei den im Folgenden vorgestellten Ansätzen durch eine Um- oder Neuplanung des Produktionsdurchlaufs realisiert. Die Umplanung unterscheidet von der Neuplanung dadurch, dass sie einen bestehenden Plan als Basis nutzt, während letztere diesen komplett neu erstellt.

Die Ansätze von KREIMEIER (1987) und BECKENDORFF (1991) nutzen Prioritätsregeln zur Änderung von Auftragsreihenfolgen im zugrundeliegenden Belegungsplan. Darüber hinaus stehen in Abhängigkeit der Fertigungssituation weitere Strategien zur Verfügung, wie z. B. die Verlagerung von Aufträgen auf alternative Ressourcen.

Die Fertigungsregelung von SIMON (1995, s. auch REINHART & SIMON 1995) übernimmt die zentrale Steuerung von freigegebenen Aufträgen. Hervorzuheben ist zum einen die Anlagen- und Auftragsüberwachung, die den zugrundeliegenden Produktionsplan an die aktuelle Situation anpasst und modellbasiert den Verlauf der Zielgrößen vorhersagt, zum anderen das Störungsmanagement. Letzteres passt bei Toleranzwertüberschreitungen entweder die Termine des Produktionsplans oder die Planungssystematik des nachgelagerten Reihenfolge-reglers, der einen neuen Produktionsplan generiert, an.

In Bezug auf die zeitliche Lage von Neuplanungsberechnungen und Ausführung der Pläne sind die Ansätze von WELLER (2002) und BRACKEL (2009) hervorzuheben. Erstgenannter Ansatz erzeugt im Falle einer Störung einen Störfallplan, mit dem kurzfristig weiterproduziert werden kann. Zeitgleich wird ein Optimierungslauf zur Erstellung eines Plans, mit dem nach Abschluss des Störfallplans weitergearbeitet wird, durchgeführt. Im zweiten Ansatz wird ebenfalls ein neuer Plan erzeugt, der bei paralleler Voraussimulation der Produktion weiter optimiert wird. Dabei wird der Plan auch ohne Vorliegen einer Störung verändert, wenn die Simulation eine Verbesserung (in Form der beeinflussbaren Kosten) errechnet hat.

Eine weitgehende Vermeidung der Neuplanung wird dagegen durch MAHAJAN (2007) versucht, indem bei der Planung alle zu erwartenden Störungen einbezogen werden. Im Falle unvorhergesehener Störungen greift dagegen ein zusätzlicher Mechanismus, der unter Einbeziehung der neuen Situation eine Umplanung vornimmt, wobei ein maßgebliches Kriterium die geringstmögliche Abweichung vom ursprünglichen Plan ist. MAHAJAN bezieht sich dabei jedoch ausschließlich auf die Beplanung paralleler Maschinen in einem FFS. Der Ansatz von RAHMAN (2013) bezieht sich ebenfalls auf FFS und fokussiert die Integration der Belegungsplanung in die Materialflusssteuerung. Die Neuplanung erfolgt dabei nach einem Optimierungsalgorithmus, der die Gesamtdurchlaufzeit des Produktionsprogramms minimiert.

In den Kontext der prädiktiv-reaktiven Steuerung durch Neuplanung sind zudem Ansätze einzuordnen, die den menschlichen Eingriff in die Produktionssteuerung als deren „zentrales Element“ werten (THOMAS 2014, S. 39). Dabei ist dem Disponenten entweder die Entscheidung über die Annahme oder Überarbeitung eines Produktionsplans (KANG 1987) oder die Mitgestaltung des Ergebnisses der Um- oder Neuplanung im interaktiven Dialog überlassen (BAMBERGER 1996). Die Planerstellung selber arbeitet in beiden Fällen mit einfachen Algorithmen und Auftragsprioritäten.

### **Ansätze außerhalb der Reglerstruktur**

Die folgenden Ansätze basieren prinzipiell auf der Produktionsregelung, sind aber nicht in das Gliederungsmodell aus Abschnitt 2.1.1 einzuordnen.

Die *Optimized Production Technology (OPT)* von GOLDRATT & COX (1987) besteht aus neun Regeln und einem Softwarepaket, in dem ein unveröffentlichter Planungsalgorithmus implementiert ist.<sup>15</sup> Zentrale Aspekte sind die Engpassfokussierung und die Materialflussorientierung. OPT ist ein Planungsverfahren,

---

<sup>15</sup> Vgl. ZIMMERMANN (1987, S. 27) sowie BAUER ET AL. (1991, S. 20). Anhand der OPT-Regeln entwickelte WEIDNER (1992) die vollständig veröffentlichte Engpassorientierte Fertigungssteuerung (EOF), deren Funktionsweise der OPT ähnelt.



das sich durch eine ereignisbasierte Neuplanung auch zur Produktionssteuerung eignet. Es setzt dabei eine stabile Belastungssituation voraus, da OPT nicht mit wechselnden Engpässen umgehen kann (SCHMIDT 2008, S. 335ff.). Somit eignet sich die OPT nicht ohne weiteres für jede Art der Werkstattfertigung.

SONNENSCHNEIDER (1998) steuert FFS auf Basis von Fuzzy-Petri-Netzen, mit denen neben der Auftragsreihenfolge auch die Maschinenauswahl erfolgt. Die Auftragsreihenfolge wird dabei losgelöst von der Produktion optimiert und entsprechende Start-/Endtermine zeitdiskret berechnet. Innerhalb einer Planungsperiode wird dann ereignisbasiert nach lokalen Zielkriterien über die Auftragsauswahl entschieden.

### 2.1.2 Sonstige Ansätze

In der Literatur existieren weitere Ansätze zur Produktionssteuerung für Einzel- und Kleinserienfertigungssysteme, die sich aufgrund ihrer Andersartigkeit nicht in den Regelkreis der PPS (s. Abb. 2.1) einordnen lassen. Im Folgenden werden diese Ansätze kurz aufgeführt.

Vor dem Hintergrund der hohen Effizienzvorteile einer getakteten Fließfertigung haben sich Ansätze zur Überführung der Einzel- und Kleinserienfertigung von der Werkstattstruktur in eine materialflussorientierte Struktur (vgl. WILDE-MANN 1984, S. 39f; SPECHT & STEFANSKA 2009) sowie Ansätze zur Realisierung einer getakteten Produktion (vgl. BORNHÄUSER 2009; GRUSS 2010; ZWANZIG 2010; ZISKOVEN 2013) entwickelt. Alle Ansätze setzen dabei eine gewisse Ähnlichkeit der Aufträge hinsichtlich der Maschinenfolge sowie eine geringe bis mittlere Varianz hinsichtlich der Bearbeitungszeiten voraus (vgl. ZWANZIG 2010, S. 96). Mit steigender Heterogenität der Produkte und der zugehörigen Fertigungsabläufe erschwert sich die Realisierung der flussorientierten Produktionskonzepte zunehmend.

Eine Vielzahl von Arbeiten (u. a. KOTSCHENREUTHER 1991; MANNMEUSEL 1997; AHRENS 1998; HENSELER 1998; KURTH 2002; MÖNCH 2006) betrachten den Einsatz von Multiagentensystemen (MAS) in der PPS.<sup>16</sup> Dabei werden die einzelnen Akteure (z. B. Aufträge, Maschinen) im System durch Softwareagenten repräsentiert, die mit anderen Agenten kommunizieren und entsprechend ihres Zielsystems agieren. MAS bieten vor allem Vorteile hinsichtlich der Integration verschiedener PPS-Aufgaben, wie z. B. die Maschinenauswahl und Reihenfolgebildung. HENSELER (1998, S. 60f.) zeigt dagegen die strukturellen Probleme von Agentensystemen auf, von denen insbesondere das Agieren nach Einzelzielen sowie die daraus resultierende mangelnde Berücksichtigung der

---

<sup>16</sup> Eine Übersicht über Multiagentensystemen im Allgemeinen geben WOOLDRIDGE & JENNINGS (1995) sowie MONOSTORI ET AL. (2006).

globalen Auswirkungen dem Ziel dieser Arbeit entgegenstehen (vgl. auch CARIDI & CAVALIERI 2004). Darüber hinaus ist der Entscheidungsverlauf von MAS nur schwer nachvollziehbar (WELLER 2002, S. 57). Insbesondere das Agieren nach Einzelzielen sowie die daraus resultierende mangelnde Berücksichtigung der globalen Auswirkungen stehen dem Ziel dieser Arbeit entgegen.

### 2.1.3 Fazit

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Arbeiten ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Dabei wurden Ansätze für FFS (KREIMEIER 1987; THOME 1990; KUPEC 1991; SONNENSCHNEIN 1998; MAHAJAN 2007; RAHMAN 2013) ausgelassen, da sie aufgrund der autonomen Materialfluss- und Maschinensteuerung Steuerungsmöglichkeiten bieten, die nicht auf die manuelle Werkstattfertigung übertragbar sind. Ebenso werden die Ansätze außerhalb des Regelungsmodells sowie die sonstigen Ansätze (Abschnitt 2.1.2) aufgrund der beschriebenen Defizite nicht weiter betrachtet.

Anhand der Zielsetzung dieser Arbeit (Abschnitt 1.2.2.1) wurden die Ansätze hinsichtlich der Eignung für die manuelle Werkstattfertigung (*Werkstattfertigung*), der Eignung als Steuerungsverfahren im Sinne der Störungsreaktion (*Steuerungsverfahren*), der verzögerungsfreien Ausführung der Reaktion<sup>17</sup> (*Verzögerungsfreiheit*), der Betrachtung der Auswirkungen auf den späteren Auftragsdurchlauf (*Globale Betrachtung*), der Prognostizierbarkeit im Sinne stetig verfügbarer Auftragsendtermine (*Terminberechnung*), der nahezu vollständigen Erschließung des Lösungsraums (*Optimierung*) sowie der Vermeidung von Planungsnervosität (*Stabilität*) beurteilt.

Die vollständig-reaktiven Steuerungsverfahren sind durch den Verzicht auf Neuberechnungen von Produktionsplänen einfach zu handhaben (vgl. auch REMPP 2003, S. 47f.). Wenn lange Auftragsdurchlaufzeiten mit hohen Schwankungen planbare Fertigstellungstermine erfordern sowie ungerichtete Materialflüsse wechselnde Engpässe im Auftragsverlauf verursachen, zeigen sich die Grenzen der Anwendung dieser Verfahren (vgl. auch BLEY & JOSTOCK 1992 und WELLER 2002, S. 40).

Bei dezentralen, einfachen Reglern erfordert die Reihenfolgeänderung einen Mindestbestand vor jedem Arbeitssystem. Mit abnehmenden Bestand verringern sich die zu erzielenden Verbesserungen (vgl. NYHUIS & WIENDAHL 2012, S. 86). Die fehlende Koordination untereinander und dezentrale Entscheidungsfreiheiten führen zu hohen Abstimmungsverlusten in anderen Bereichen (vgl. BRINKOP & NULLMEIER 1991; JOSTOCK & BLEY 1992). Gemeinsame

---

<sup>17</sup> Aufgrund der Berechnungskomplexität einiger Steuerungsverfahren wurden Rechenzeiten im Bereich von mehreren Minuten ebenfalls als verzögerungsfrei gewertet.

Abstimmungen der Bereiche erfordern einen hohen Zeitaufwand und sind somit nicht für zeitkritische Entscheidungen geeignet. Aus diesem Grund kann eine ganzheitliche Optimierung des Auftragsdurchlaufs nicht ad-hoc bei der Auswahl eines Auftrags an einem Fertigungssystem erfolgen, stattdessen ist der Produktionsdurchlauf über einen längeren Zeitraum zu betrachten (SONNENSCHNEID 1998, S. 75).

Dagegen liegt den prädiktiv-reaktiven Steuerungsverfahren stets der geplante Produktionsablauf in Form eines Ablaufplans zugrunde, der durch den jeweiligen Regler adaptiv angepasst wird. Dadurch wird zum einen erreicht, dass die Fertigstellungstermine auf Basis der zugrundeliegenden Situation jederzeit verfügbar sind. Zum anderen ermöglichen diese Verfahren die Berücksichtigung der Auswirkungen auf die gesamte Fertigung bei jeder Steuerungsentscheidung. Bei wissensbasierten Verfahren beschränkt sich der Handlungsraum auf vordefinierte Maßnahmen, mit denen nur ein Bruchteil des Lösungsraums erschlossen werden kann. Darüber hinaus sind diese Verfahren bisher meist als offene Regelkreise definiert, in denen der Mensch als finale Instanz die Entscheidung über die umzusetzenden Maßnahmen trifft. Dies ist aufgrund des Erfahrungseinflusses des Produktionssteuerers (z. B. bei der Störungsbeurteilung) zwar notwendig, aber stets mit einer Verzögerung der Reaktionszeit und erfahrungsbedingten Qualitätsunterschieden verbunden (vgl. MARTIN 1998, S. 43ff.).

Eine verzögerungsfreie Reaktion wurde mit prädiktiv-reaktiven Verfahren der Um- und Neuplanung bereits realisiert, darüber hinaus ermöglichen sie im Gegensatz zu regelbasierten Verfahren die Erschließung großer Lösungsräume. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Lösungen vom ursprünglichen Produktionsplan stark unterscheiden können. Eine häufige Änderung führt somit zu Planungsnervosität, da sich die Vorgaben auf Arbeitssystemebene stets ändern. Als Beispiel sei hier das Steuerungssystem von BRACKEL (2009) genannt, das permanent Optimierungen ausführt und damit selbst ohne zugrundeliegende Störungen Änderungen im Produktionsplan hervorruft.

Gemäß Tabelle 2.1 erfüllt kein System alle Anforderungen. Ein hohes Potenzial für echtzeitfähige Werkstattsteuerungen bietet die prädiktiv-reaktive Strategie der Produktionsregelung. Dabei bieten wissensbasierte Ansätze durch die nur partielle Neuplanung die Möglichkeit, eine zu hohe Planungsnervosität zu vermeiden. Deren Defizit ist dagegen, dass ein großer Teil des Lösungsraums verschlossen bleibt, während Verfahren der Neuplanung bisher zu hohe Rechenzeiten aufweisen sowie zu starke Änderungen im Produktionsplan hervorrufen. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt zunächst Optimierungsverfahren zur Erstellung von Belegungsplänen betrachtet, während die maßnahmenbasierte Reaktion auf Störungen als steuerungsrelevantes Problemfeld in Abschnitt 2.3.1 vertieft wird.

**Tab. 2.1:** Zusammenfassung ausgewählter Ansätze zur Produktionsregelung

Strategie	Reglertyp	Ansatz	Werkstattfertigung	Steuerungsverfahren	Verzögerungsfreiheit	Globale Betrachtung	Terminberechnung	Optimierung	Stabilität	Architektur	
vollständig-reaktiv	BR	BECHTE (1980); WIENDAHL (1987a)	●	●	○	○	○	○	●	Z	
		REMPF (2003)	●	●	○	○	○	○	○	Z/D	
		BUZACOTT & SHANTHIKUMAR (1992)	●	●	●	○	○	○	○	●	D
		SURI (1998)	●	●	●	○	○	○	○	○	D
		HOPP & SPEARMAN (2001)	●	●	●	○	○	○	○	○	D
		NITTKA (1996)	●	●	●	○	○	○	○	○	D
	LÖDDING (2001)	●	●	●	○	○	○	○	○	D	
	KR	BREITHAAPT (2001)	●	●	○	○	○	○	○	○	D
		BEGEMANN (2005)	●	●	○	○	○	○	○	○	D
	BL	BUSCH (1987)	●	●	○	○	○	○	○	○	H
		MÄRTENS ET AL. (2007)	●	●	●	○	○	○	○	○	D
		KIENZLE (2012)	●	●	○	○	○	○	○	○	D
		REINHART ET AL. (2013)	●	●	○	○	○	○	○	○	H
		ENGELHARDT (2015)	●	●	●	○	○	○	○	○	Z/D
	BRINZER (2005)	●	●	●	○	○	○	○	○	H	
prädiktiv-reaktiv	WR	ARPING (1977)	●	●	○	●	●	○	○	○	Z
		ROSE (1989)	●	●	○	○	●	●	○	○	Z
		RINGLSTETTER (1992); BELZ (1993)	●	●	○	○	○	○	○	○	Z
		WEINBRECHT (1993)	●	●	○	○	●	●	○	○	Z
		LE PAPE (1994)	●	○	○	●	●	○	○	○	Z
		SYCARA & MIYASHITA (1994)	●	○	○	●	●	○	○	○	Z
		JOSTOCK & BLEY (1994)	●	○	○	○	●	●	○	○	H
	MARTIN (1998)	●	●	●	●	●	○	○	○	H	
	NU	BECKENDORFF (1991)	●	○	○	●	●	○	○	○	Z
		SIMON (1995)	●	●	○	●	●	○	○	○	H
WELLER (2002)		●	●	●	●	○	○	○	○	Z	
BRACKEL (2009)	●	●	●	●	○	○	○	○	Z		
KANG (1987)	●	○	○	●	●	○	○	○	Z		
BAMBERGER (1996)	●	●	○	●	●	○	○	○	Z		

○ erfüllt Aspekt nicht      KR: Kapazitätsregelung      Z: zentral  
 ● erfüllt Aspekt teilweise      BL: Belastungsregelung      D: dezentral  
 ● erfüllt Aspekt voll      WR: Wissensbasierte Regelung      H: hierarchisch  
 BR: Bestandsregelung      NU: Regelung durch Um-/Neuplanung

## 2.2 Optimierung der Maschinenbelegung

Eine Neuplanung im Kontext der Produktionssteuerung erfordert eine kurzfristige Optimierung der Maschinenbelegung, d. h. die Festlegung, wann welcher Auftrag auf welcher Maschine bearbeitet wird. Das entsprechende kombinatorische Problem aus dem Operations Research, Job Shop Scheduling Problem (JSSP) genannt, wird in der Literatur zur PPS aufgegriffen (vgl. DOMSCHKE ET AL. 1997, S. 396ff.; DANGELMAIER & WARNECKE 1997, S. 609ff.; HANSMANN 2006, S. 353ff.). Im nachfolgenden Kapitel werden das JSSP (Abschnitt 2.2.1.1), entsprechende Lösungsalgorithmen (Abschnitt 2.2.2) sowie den Bezug zur Dynamik der Produktionssteuerung (Abschnitt 2.2.3) vorgestellt.<sup>18</sup>

### 2.2.1 Job Shop Scheduling Problem

#### 2.2.1.1 Überblick und Notation

Das JSSP ist in Anlehnung an BRUCKER (2001, S. 179), BRUCKER & KNUST (2006, S. 189ff.) und FRENCH (1982) wie folgt definiert: Es ist eine Anzahl von  $n$  Jobs<sup>19</sup>  $i = 1, \dots, n$  auf  $m$  Maschinen  $M_1, \dots, M_m$  zu fertigen. Dabei setzt sich jeder Job aus einer Sequenz von  $n_i$  Operationen  $O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,n_i}$  zusammen. Charakteristisches Merkmal ist hier die Einhaltung der technologischen Vorschrift  $O_{i,1} \rightarrow O_{i,2} \rightarrow \dots \rightarrow O_{i,n_i}$ . Mit jeder Operation  $O_{i,j}$  ist eine Maschine  $\mu_{i,j} \in \{M_1, \dots, M_m\}$  sowie eine Prozessdauer  $p_{i,j}$  verknüpft.<sup>20</sup> Die Zielfunktion ist in der Regel die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit<sup>21</sup>  $C_{max}$ , die dem Endzeitpunkt der zuletzt durchgeführten Operation entspricht. Bezugnehmend auf den Terminus der PPS entspricht  $M$  den Maschinen bzw. Ressourcen,  $J_i$  den Aufträgen und  $O_{i,j}$  den Arbeitsvorgängen.

Wie in der realen Werkstattfertigung ist auch das JSSP durch unterschiedliche Maschinenfolgen der einzelnen Aufträge charakterisiert und grenzt sich dadurch zu anderen Shop-Scheduling-Problemen ab.<sup>22</sup> Innerhalb des JSSP existieren besondere Ausprägungen des JSSP, wie dem Flexible Job Shop Scheduling

<sup>18</sup> Für vertiefende Informationen zum JSSP sei neben frühen Grundlagenwerken von MUTH ET AL. (1963), BAKER (1974, S. 177ff.) und FRENCH (1982) vor allem auf die Arbeiten von BRUCKER (2001), BRUCKER & KNUST (2006) sowie LEUNG (2004) verwiesen.

<sup>19</sup> Der Job wird mit  $i$  indiziert und in der Regel als  $J_i$  bezeichnet.

<sup>20</sup> In der Literatur wird teilweise auch der Parameter  $j$  als Laufindex für die Maschine verwendet, dies bedingt jedoch, dass jeder Auftrag jede Maschine maximal einmal durchlaufen kann (vgl. FRENCH 1982, S. 5).

<sup>21</sup> Engl. *makespan*, vgl. SCHUTTEN (1998).

<sup>22</sup> U. a. das Flow Shop Scheduling Problem mit identischen Maschinenfolgen aller Aufträge (entspricht der Fließfertigung, vgl. DOMSCHKE ET AL. 1997, S. 285; FRENCH 1982, S. 5) oder das Open Shop Scheduling Problem ohne definierte Maschinenfolge.

Problem (FJSSP), bei dem neben der Reihenfolgebildung auch die Auswahl von Maschinen und Fertigungsfolgen erfolgt (vgl. BRANDIMARTE 1993).

Das JSSP gilt als eines der schwierigsten kombinatorischen Probleme, da der Lösungsaufwand mit steigender Problemgröße exponentiell zunimmt (GAREY ET AL. 1976; LENSTRA ET AL. 1977). Forschungsarbeiten zum JSSP nutzen Benchmarkinstanzen zur Leistungsmessung sowie zum Vergleich unterschiedlicher Algorithmen. Benchmarkinstanzen existieren in unterschiedlicher Größe und Komplexität. Die Notation der Dimension des Problems wird in der Regel durch  $n \times m$  ausgedrückt (JAIN & MEERAN 1999). Häufig verwendete Beispielinstanzen, von denen die bekannteste das sog. *FT10*-Problem von FISHER & THOMPSON (1963) ist, haben eigene Bezeichnungen (s. JAIN & MEERAN 1999; HENNING 2002, S. 39).

Die zu lösenden Aufgaben im JSSP lassen sich in das *Sequencing* und *Scheduling*<sup>23</sup> einordnen, die je nach Lösungsverfahren auch wiederholt ausgeführt werden (FRENCH 1982, S. 26). Das Ergebnis des Sequencing ist die Auftragsreihenfolge auf den jeweiligen Maschinen, im Scheduling werden die Start und Endzeitpunkte der jeweiligen Operationen ergänzt. Beide Aufgaben werden im Folgenden kurz skizziert.

### 2.2.1.2 Sequencing

Während des Sequencing wird die Reihenfolge bzw. Sequenz der auf den jeweiligen Maschinen auszuführenden Operationen festgelegt. Das Ergebnis der Sequenz wird dabei sowohl durch den gewählten Lösungsalgorithmus als auch die Repräsentation der Auftragsreihenfolgen beeinflusst. Letztere ist die Ausgangsbasis für die Anwendung der Lösungsalgorithmen und beeinflusst stark deren Leistungsfähigkeit. Die Repräsentationsformen lassen sich in Bezug auf BIERWIRTH ET AL. (1993)<sup>24</sup>, CHENG ET AL. (1996), BRUNS (1996, S. 108ff.), MATTFELD (1996, S. 68), KÄSCHEL ET AL. (1997, S. 3f.) und RIXEN (1997, S. 85ff.) wie folgt unterteilen:

- *Symbolische Repräsentation*: Beschreibung der Operationsfolgen in einzelnen Sequenzen für jede Maschine.
- *Task-Sequenzen*: Anordnung aller Operationen in einer Sequenz, die durch Zuordnen der Maschinen zu den Operationen von links nach rechts

---

<sup>23</sup> Die Maschinenbelegungsplanung an sich wird z. T. ebenfalls als Scheduling bezeichnet (vgl. z. B. DOMSCHKE ET AL. 1997, S. 279), ob ein Zusammenhang zum JSSP besteht, ist im Einzelfall aus dem Kontext herzuleiten.

<sup>24</sup> Die indirekte Repräsentation, wie sie BIERWIRTH ET AL. (1993) beschreibt, erlaubt lediglich die Darstellung aller Lösungen bei identischen Maschinenfolgen und wird daher aufgrund fehlender Eignung für das JSSP nicht berücksichtigt.

evaluiert wird. Eine Variante der Task-Sequenzen ist die Random Key-Repräsentation von BEAN (1992), bei der Zufallszahlen die Reihenfolge kodieren und entsprechend den Operations-Nummern zugeordnet werden.

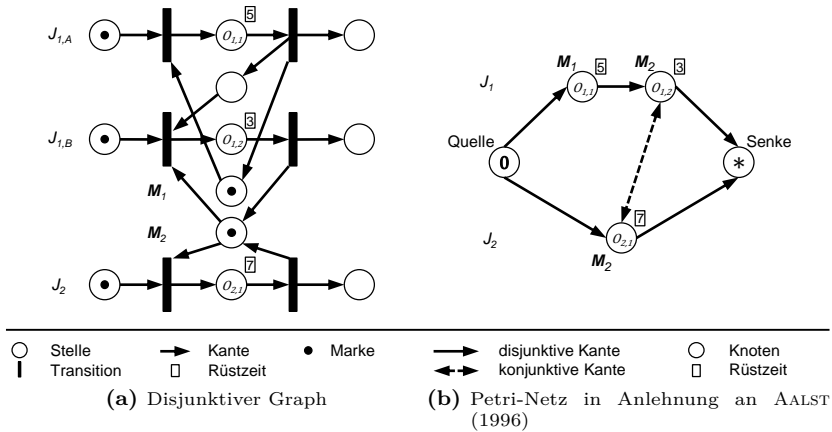
- *Permutation mit Wiederholungen*: Ähnlich der Task-Sequenz, hier wird an Stelle der Operation die jeweilige Job-Nummer in der Anzahl der enthaltenen Operationen aufgeführt, um ungültige Sequenzen zu vermeiden (vgl. BIERWIRTH ET AL. 1993; BIERWIRTH 1995). Eine Variante von KÄSCHEL ET AL. (1997) trennt zudem die Reihenfolgen einzelner Maschinen.
- *Darstellung nach RIXEN & KOPFER*: Ein Chromosom<sup>25</sup> legt die Reihenfolge von Arbeitsoperationen fest, die an gleicher Stelle einer technologischen Vorschrift stehen, ein weiteres Chromosom definiert die Reihenfolge bei Konflikten (vgl. RIXEN & KOPFER 1994).
- *Binäre Repräsentation*: Beschreibung der Reihenfolge als Binärstrings, in denen die Vorrangbeziehungen zwischen den Operationen aller Aufträge dargestellt sind (vgl. NAKANO & YAMADA 1991).
- *Direkte Repräsentation*: Integration aller Informationen, die zur Darstellung eines Schedules benötigt werden, in einem Chromosom, um auf das anschließende Scheduling verzichten zu können (vgl. BRUNS 1993).<sup>26</sup>
- *Graphentheoretische Repräsentation*: Darstellung der Reihenfolgen als kritische Pfade, basierend auf einer graphentheoretischen Formulierung des Maschinenbelegungsproblems (vgl. BALAS 1969).

Während die meisten Repräsentationsformen der Kodierung des Problems zur Anwendung von Lösungsalgorithmen dienen und als Matrizen oder Zeilenvektoren modelliert werden (s. DANNINGER 2012, S. 32ff.), ermöglichen graphentheoretische Modelle auch die Visualisierung von Auftragsreihenfolgen. In der Regel wird dabei auf die Modellierungsvorschrift der *disjunktiven Graphen*, die erstmals von ROY & SUSSMANN (1964) veröffentlicht wurden, zurückgegriffen (s. Abb. 2.3a).

Ein disjunktiver Graph ist ein Graph  $G = (V, C, D)$ , bei dem im JSSP  $V$  die Menge der Knoten, die durch die Operationen  $O_{i,j}$  gebildet wird, beschreibt und die Kanten durch  $C$  und  $D$  beschrieben werden. Dabei bezeichnet  $C$  die konjunktiven (gerichteten) Kanten, mit den die Vorrangbeziehungen aus der Maschinenfolge dargestellt sind, und  $D$  die disjunktiven (ungerichteten)

<sup>25</sup> Ein Chromosom bezeichnet im Kontext des JSSP, insbesondere bei Genetischen Algorithmen, die entsprechend der Repräsentationsform kodierte Sequenz (vgl. GERDES ET AL. 2004, S. 36f.; FISCHÄDER 2007, S. 199).

<sup>26</sup> Die erforderlichen Berechnungen werden stattdessen während des Sequencing ausgeführt, sodass eine nennenswerte Reduzierung der Rechenzeit fragwürdig ist.



**Abb. 2.3:** Darstellungsformen eines JSSP bestehend aus 2 Maschinen und 2 Aufträgen

Kanten, welche alle Operationen, die auf einer Maschine bearbeitet werden, miteinander verbinden. Wenn für eine Maschine eine Auftragsfolge festgelegt wird, wandeln sich die ungerichteten Graphen in gerichtete. Eine solche Lösung des JSSP wird auch als *vollständige Selektion* bezeichnet. Die Menge  $C$  gibt somit die Maschinenfolge aus Sicht der Jobs vor, während die Menge  $D$  die Auftragsfolgen aus Sicht der Maschinen benennt.<sup>27</sup>

Eine weitere Möglichkeit der graphentheoretischen Darstellung sind Petri-Netze<sup>28</sup> (vgl. CARLIER ET AL. 1984; GROHA 1988, S. 95ff.; HILION & PROTH 1989; AALST 1996). Dabei wird die Stellen-/Transitionen (S-/T)-Netz-Klasse (vgl. ABEL 1990, S. 4) verwendet. Die Stellen repräsentieren Teilzustände im System, die Bedingung für das Eintreten bestimmter Ereignisse sind. Die Ereignisse werden mit Transitionen abgebildet. Beide sind als Knoten im Petri-Netz ausgebildet, die durch gerichtete Kanten verknüpft sind.

In Abb. 2.3 ist ein JSSP mit den Aufträgen  $J_1$  und  $J_2$  sowie den Maschinen  $M_1$  und  $M_2$  als disjunktiver Graph sowie als Petri-Netz abgebildet. Die technologische Vorschrift  $O_{1,1} \rightarrow O_{1,2}$  ist durch eine verknüpfende Stelle zwischen  $J_{1,A}$  und  $J_{1,B}$  gegeben. Im disjunktiven Graphen ist diese Vorrangbeziehung durch die Kante zwischen den beiden Operationen abgebildet. Die Bearbeitungszeiten

<sup>27</sup> Für weitere Ausführungen zu disjunktiven Graphen sei u. a. auf BRUCKER & KNUST (2006, S. 190ff.) verwiesen.

<sup>28</sup> Erstmals durch PETRI (1962) beschrieben.

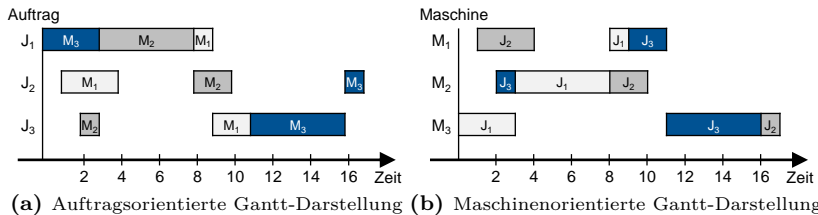


sind im Petri-Netz als Gewichtung des Zustandes anzugeben, im disjunktiven Graphen ist diese an den Knoten anzutragen. Bei derselben Sequenz benötigt die Darstellung durch Petri-Netze ca. doppelt so viele Knoten im Vergleich zu disjunktiven Graphen. Da größere Sequenzen schnell unübersichtlich werden, werden disjunktive Graphen häufiger zur Modellierung des JSSP genutzt.

Während des Sequencing ist es bei einigen Repräsentationsformen möglich, dass unzulässige oder inkonsistente Lösungen entstehen. Während unzulässige Lösungen außerhalb des Wertebereichs einer Variablen liegen (z. B. Bearbeitung auf Maschinen, die technologisch nicht geeignet sind), entstehen inkonsistente Lösungen durch die gleichzeitige Zuordnung einander widersprechender Werte zweier Variablen (vgl. SCHULTE 1995, S. 71). Aus diesem Grund sind entweder Reparaturalgorithmen vorzusehen, die die Richtigkeit einer Lösung wiederherstellen, oder es ist ein Lösungsalgorithmus zu verwenden, der unzulässige oder inkonsistente Lösungen von Beginn an ausschließt.

### 2.2.1.3 Scheduling

Zur Bewertung der Sequenz hinsichtlich des Zielfunktionswertes ist die Ermittlung der einzelnen Start- und Endzeitpunkte der Operationen im Rahmen des Scheduling erforderlich (SCHWARTZ 2004, S. 34). Die Darstellung von Schedules erfolgt in sog. Gantt-Diagrammen (GANTT 1903; CLARK 1922; WILSON 2003), in denen die einzelnen Operationen graphisch im zeitlichen Verlauf eingetragen sind. Dabei ist auf der Abszisse stets die Zeit dargestellt, während eine Unterteilung der Ordinate nach Aufträgen (auftragsorientiert) oder Maschinen (maschinenorientiert) möglich ist. Ein Beispiel ist in Abb. 2.4 dargestellt.

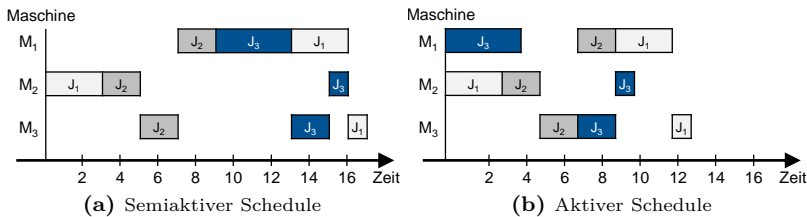


**Abb. 2.4:** Auftrags- und maschinenorientierte Darstellung eines Gantt-Diagramms

Die Scheduling-Technik hat ebenfalls einen hohen Einfluss auf die Güte eines Lösungsalgorithmus. So entstehen bei Verwendung unterschiedlicher Scheduling-Techniken verschiedene Lösungen aus derselben Sequenz (vgl. FRENCH 1982, S. 26; BIERWIRTH ET AL. 1993).

Die bedeutendste Unterscheidung innerhalb des Scheduling liegt in der Erzeugung semiaktiver oder aktiver Schedules (s. Abb. 2.5) Ein semiaktiver Schedule

liegt vor, wenn keine Arbeitsoperation früher beginnen kann, ohne die Auftragsfolge zu verändern (vgl. BAKER 1974, S. 181). Dies wird erreicht, indem alle Arbeitsvorgänge frühestmöglich innerhalb der gegebenen Auftragsreihenfolge beginnen (lokale Linksverschiebung, vgl. TEICH 2003, S. 310). Demgegenüber ist ein aktiver Ablaufplan dadurch gekennzeichnet, dass keine Arbeitsoperation früher beginnen kann, ohne eine andere Arbeitsoperation zu verzögern (GIFFLER & THOMPSON 1960; TEICH 2003, S. 310). Somit werden, im Vergleich zu semiaktiven Ablaufplänen, Operationen, die in der Auftragsfolge einer Maschine Vorrang haben, übersprungen, um davorstehende Leerzeiten auszunutzen. Aktive Schedules sind sehr kompakt und unterstützen somit die Optimierung der minimalen Gesamtdurchlaufzeit.



**Abb. 2.5:** Semiaktiver und aktiver Schedule derselben Sequenz

Für eine Vielzahl von Sequenzen ist kein zulässiger Ablaufplan ableitbar, da an einer Stelle des Plans ein sog. Deadlock<sup>29</sup> auftritt (BIERWIRTH ET AL. 1993).

### 2.2.2 Lösungsverfahren

Zur Lösung des JSSP wurde eine Vielzahl an Lösungsverfahren entwickelt. Einen Überblick über die Entwicklung und den jeweils aktuellen Stand geben die Arbeiten von GRAVES (1981), BŁAŻEWICZ ET AL. (1996), JAIN & MEERAN (1998a), JAIN & MEERAN (1999) sowie SCHWARTZ (2004, S. 21ff.).

Eine Einteilung erfolgt in optimierende Lösungsverfahren, konventionelle Lösungsverfahren sowie Verfahren der künstlichen Intelligenz (vgl. SCHULTZ ET AL. 1995; FISCHER 2007, S. 9; EVERS 2002, S. 25f.).

Innerhalb der optimierenden Lösungsverfahren unterscheidet MÜLLER-MERBACH (1970, S. 25) zwischen der Vollenumeration, bei der alle

<sup>29</sup> Ein Deadlock ist eine Situation, „in der zwei oder mehrere Prozesse gegenseitig auf das Schaffen von Voraussetzungen für die Fortsetzung der eigenen Arbeit warten“ (KÄSCHEL ET AL. 1997, S. 3).

kombinatorisch möglichen Lösungen berechnet werden, sowie dem Entscheidungsbaumverfahren, bei dem Äste eines Lösungsbaum nicht weiter verfolgt werden, wenn ein Optimum in diesem Ast auszuschließen ist. Letzteres wirkt sich vorteilhaft auf die Rechenzeit aus (MÜLLER-MERBACH 1970, S. 27f.). Ein auf das Job-Shop Scheduling Problem angewendetes Entscheidungsbaumverfahren ist der Branch-and-Bound (BB)-Algorithmus (z. B. auf das *FT10*-Problem durch CARLIER & PINSON 1989). Für größere Probleme ist dies aufgrund des Rechenaufwandes jedoch nicht mehr durchführbar (vgl. u. a. BIERWIRTH ET AL. 1993 und FISCHER 2007, S. 18f.).

Lösungsverfahren der künstlichen Intelligenz (KI) haben den Nachteil, dass die Lösungsfindung in der Regel nur durch Expertenwissen nachvollzogen werden kann. Agentensysteme zeichnen sich zudem dadurch aus, dass die Entscheidungen aus lokaler Sicht getroffen werden und somit nur lokal optimale Lösungen möglich sind (vgl. FISCHER 2007, S. 11 sowie Abschnitt 2.1.2). Daher finden sie im Bereich des global orientierten JSSP nahezu keine Anwendung. Auch künstliche neuronale Netze wurden bereits im Rahmen der Werkstattsteuerung angewendet (vgl. MÄRTENS & SAUER 1998; JAIN & MEERAN 1998b; GARETTI & TAISCH 1999b), allerdings zeigen diese bisher eine geringe Leistung gegenüber anderen Verfahren bei gleichzeitig hohem Rechenaufwand (WELLER 2002, S. 54). Eine Übersicht über Forschungsarbeiten zu Verfahren der KI geben SCHULTZ ET AL. (1995).

Konventionelle Verfahren, sog. Heuristiken, werden am häufigsten zur Lösung des JSSP angewendet. Diese Heuristiken enthalten Vorgehensregeln, die im Hinblick auf die Erfüllung einer bestimmten Zielfunktion vielversprechend erscheinen (EVERS 2002, S. 28). Dieses Vorgehen führt nicht unbedingt zum Optimum, ermöglicht aber sehr gute Lösungen in der Nähe des Optimums (MÜLLER-MERBACH 1970, S. 34). Dabei wird zwischen Eröffnungsverfahren, mit denen eine einzige Lösung auf dem direkten Weg ermittelt wird, und suboptimierenden Iterationsverfahren, mit denen schrittweise eine bestehende Lösung verbessert wird, unterschieden (MÜLLER-MERBACH 1970, S. 34). Typische Eröffnungsverfahren sind Prioritätsregeln, während die Iterationsverfahren ein breites Spektrum an Lösungsalgorithmen abdecken, aus denen hier nur die bekanntesten und leistungsfähigsten vorgestellt werden.

### 2.2.2.1 Eröffnungsverfahren

Als Grundprinzip der Eröffnungsverfahren dient die iterative Vervollständigung von Teillösungen, wobei unterschieden wird zwischen Verfahren, die mit jedem Iterationsschritt die größtmögliche Verbesserung des Zielwertes anstreben,<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Verfahren zur größtmöglichen Verbesserung des Zielwerts werden nach DOMSCHKE ET AL. (1997, S. 45) auch als *greedy* (dt.: gierig) oder *myopisch* (kurzsichtig) bezeichnet.

und sog. vorausschauenden Verfahren, die bei jedem Schritt abschätzen, welche Auswirkungen eine Fixierung der Variablen auf die in nachfolgenden Schritten zu erzielende Lösungsgüte hat (DOMSCHKE ET AL. 1997, S. 45). Die Eröffnungsverfahren lassen sich nach ACKER (2011, S. 105) in Prioritätsregeln und Engpass- bzw. Shifting-Bottleneck-Verfahren unterscheiden.

### Prioritätsregeln

Analog zur praktischen Anwendung (vgl. Abschnitt 1.2.2.2) haben sich Prioritätsregeln aufgrund der hohen Komplexität auch als Eröffnungsverfahren des JSSP bewährt. Diese garantieren die technische Realisierung der erstellten Produktionsabläufe (vgl. HAUPT 1989; BIERWIRTH ET AL. 1993), die Lösungsgüte fällt im Vergleich zu anderen Lösungsverfahren hingegen ab (TEICH 1998, S. 66). Eine Übersicht zu Prioritätsregeln geben die Arbeiten von BLACKSTONE ET AL. (1982), HAUPT (1989) und NEIDHARDT (2007).

BLACKSTONE ET AL. (1982) klassifizieren Prioritätsregeln nach der Dimension der Priorisierungskriterien. Dies sind Bearbeitungszeiten, Termine sowie eine dritte Klasse für Regeln, die keine der beiden Punkte enthalten, wie z. B. First In – First Out (FIFO). Zu dieser zählen auch Prioritätsregeln, die sich auf die produktionsbezogenen Kosten (HOFFMANN & SCUDDER 1983) oder den Wert des Auftrags (AGGARWAL ET AL. 1973; PAULIK 1984) beziehen. Es existieren auch kombinierte Prioritätsregeln (BLACKSTONE ET AL. 1982; HANSMANN 2006, S. 354) sowie situationsbasiert ausgewählte Prioritätsregeln (vgl. z. B. LIU & DONG 1996). Eine Bewertung von Prioritätsregeln hinsichtlich der Erfüllung wirtschaftlicher Zielgrößen stellt JONES (1973) vor.

Weiterhin wird zwischen der Reihenfolgebildung für jeweils eine Maschine (lokale Prioritätsregeln) und für das gesamte Produktionssystem (globale Prioritätsregeln) unterschieden (PAULIK 1984, S. 50; HAUPT 1989; FANDEL ET AL. 1997, S. 375). Zur Lösung des JSSP sind aufgrund der globalen Problemstruktur letztere besonders vielversprechend (z. B. *Extended Work in Next Queue Rule (XWINQ)*), s. CONWAY ET AL. 1967 und LÖDDING 2008, S. 450ff.).<sup>31</sup>

Die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit im JSSP wird u. a. mit dem Algorithmus von GIFFLER & THOMPSON (1960) realisiert. Dieser sog. *Giffler-Thompson-Algorithmus* erzielt aktive Schedules durch die schrittweise Einplanung der Operationen mit dem frühesten Start- bzw. Fertigstellungsdatum und ist in der Ursprungsform somit ebenfalls den Prioritätsregeln zuzuordnen.

---

<sup>31</sup> Im Steuerungskontext zeichnet sich die globale Sichtweise bei Prioritätsregeln dadurch aus, dass eine Störung an einem Arbeitssystem eine Reihenfolgeänderung an einem anderen Arbeitssystem verursachen kann (vgl. FISCHER 2007, S. 15).

### Shifting Bottleneck Algorithmus

Der *Shifting-Bottleneck-Algorithmus* (SB) von ADAMS ET AL. (1988) nutzt disjunktive Graphen zur Repräsentation des JSSP. Das Problem wird dabei in Ein-Maschinen-Probleme zerlegt und beginnend von der Engpassmaschine für jede Maschine, die noch nicht eingeplant wurde, jeweils optimal gelöst. Im Anschluss wird die Reihenfolge der bereits eingeplanten Maschinen erneut optimiert, bis eine ideale Reihenfolge gefunden wurde und die jeweils nächste Maschine ausgewählt. Dabei stellen ADAMS ET AL. (1988) neben dem klassischen Algorithmus (SB I) auch eine Variante zur Reduzierung des Suchbaums vor (SB II).

Weitere Ansätze erweitern den SB um Randbedingungen der Praxis wie z. B. Rüstzeiten, Materialverfügbarkeiten oder Fertigstellungszeitpunkte (IVENS & LAMBRECHT 1996; SCHUTTEN 1998; BÜLBÜL & KAMINSKY 2013), testen Benchmarkinstanzen (DEMIRKOL ET AL. 1997) oder wenden den SB auf Praxisprobleme an (vgl. OVACIK & UZSOY 1992; DRIESSEL 2011).

Der SB ist ein schnelles Verfahren für Probleme mittlerer Größe, wo es sehr gute Ergebnisse liefert. Mit steigender Problemgröße nimmt dessen Eignung hingegen ab (vgl. BIERWIRTH ET AL. 1993; MATTFELD 1996, S. 26f.).

#### 2.2.2.2 Iterationsverfahren

Heuristische Iterationsverfahren erfordern eine existierende Lösung (z. B. durch Eröffnungsverfahren) und versuchen, diese durch kleine Änderungen schrittweise zu verbessern. Im Gegensatz zu Enumerationsverfahren können mit ihnen auch große Problemdimensionen sehr schnell gelöst werden, wobei die Lösung zwar häufig sehr gut ist, das globale Optimum hingegen selten erreicht wird. Im Rahmen des JSSP sind die Nachbarschaftssuchverfahren<sup>32</sup> und Populationsuchverfahren von Bedeutung.

Nachbarschaftssuchverfahren basieren auf einer geeigneten Modellierung der Nachbarschaft  $N(s)$ , die als Menge aller Lösungen, die sich durch erlaubte Änderungen an der Lösung  $s$  erzielen lassen, definiert ist (BŁAŻEWICZ ET AL. 1996; RIXEN 1997, S. 53). Die erlaubten Änderungen sind dabei im jeweiligen Algorithmus hinterlegt und verändern die Ursprungslösung in der Regel nur geringfügig, wie z. B. der Reihenfolgetausch zweier Aufträge (MATTFELD 1996, S. 27; GARETTI & TAISCH 1999a). RIXEN (1997, S. 57ff.), MATTFELD (1996, S. 28ff.) und BŁAŻEWICZ ET AL. (1996) geben eine Übersicht zu verschiedenen Nachbarschaftssuchstrategien.

<sup>32</sup> Engl. Neighbourhood Search, auch lokale Suchverfahren genannt.

Eine Lösung wird durch eine andere Lösung ersetzt, wenn sie eine Verbesserung der Zielfunktion mit sich bringt (*Hill Climbing*, vgl. MATTFELD 1996, S. 27) oder zu einer akzeptierten Verschlechterung des Zielwerts führt. Letzteres erlaubt das Ausbrechen aus einem lokalen Optimum (vgl. MATTFELD 1996, S. 28). Dies kann auch durch die Generierung von Mengen an Lösungen, bei der die jeweils beste Lösung die Ausgangslösung ersetzt, erreicht werden (*Steepest Ascent/Descent-Strategie*, vgl. MATTFELD 1996, S. 41). AARTS ET AL. (1994), VAESSENS ET AL. (1996) und DORN ET AL. (1996) vergleichen verschiedene lokale Suchverfahren, von denen im Folgenden die für das JSSP wichtigen Verfahren Simulated Annealing, Threshold Accepting und Tabu-Suche vorgestellt werden.

Neben Nachbarschaftssuchverfahren führen HERTZ & WIDMER (2003) die Populationssuche als weitere Suchtechnik innerhalb der Iterationsverfahren auf, bei der eine Menge (Population) an Lösungen iterativ verändert wird. Die bedeutendsten Vertreter sind die Evolutionären Algorithmen (inklusive der Genetischen Algorithmen) und die Ant-Colony-Optimization-Algorithmen, die im weiteren Verlauf vorgestellt werden.

### **Simulated Annealing**

Der Simulated-Annealing-Algorithmus (SA)<sup>33</sup> wurde nach dem thermodynamischen Verhalten von Abkühlvorgängen bei Festkörpern entwickelt, bei dem sich die Atome in eine vollkommen geordnete Kristallstruktur mit einem Zustand minimaler Energie anordnen. Dies wird nur durch eine geeignete Abkühlgeschwindigkeit erreicht (vgl. KIRKPATRICK ET AL. 1983). Die Lösungssuche erfolgt innerhalb der Nachbarschaft des repräsentierten Problems, wobei in der Regel die beste Lösung sowie die vorangegangene Lösung gespeichert werden. Beste Lösungen werden immer sofort übernommen, indem die vorangegangene Lösung überschrieben wird. Bei einer schlechteren Lösung wird probabilistisch entschieden, ob diese Verschlechterung akzeptiert wird. Zu Beginn wird durch die Akzeptanz von Verschlechterungen das Ausbrechen aus lokalen Optima ermöglicht, mit zunehmender Iteration steigt hingegen der Selektionsdruck<sup>34</sup>. Der Verlauf der Akzeptanzschwelle ist in Abhängigkeit von den Iterationsschritten im sog. Abkühlplan definiert. Ein Abbruch erfolgt, wenn nach einer vorgegebenen Anzahl von Temperaturstufen keine Verbesserung mehr erreicht wurde. Die Anwendbarkeit auf das JSSP wurde durch LAARHOVEN ET AL. (1992) erstmals erfolgreich aufgezeigt. Für weitere Ausführungen zum Simulated Annealing sei auf LAARHOVEN & AARTS (1987) verwiesen.

---

<sup>33</sup> Dt. Simulierte Abkühlung.

<sup>34</sup> Selektionsdruck bezeichnet eine fitnessabhängige Selektionswahrscheinlichkeit, die zu einer schnellen Konvergenz der Lösungen führt (vgl. auch POHLHEIM 2000, S. 17ff.).

### Threshold Accepting

Eine Abwandlung des SA ist der von DUECK & SCHEUER (1990) vorgestellte Threshold-Accepting-Algorithmus (TA)<sup>35</sup>. Eine Anwendung auf das JSSP erfolgte erstmals durch SIEDENTOPF (1995). Beim TA wird eine neu errechnete Lösung genau dann akzeptiert, wenn ihr Fitnessunterschied in Bezug auf die Ausgangslösung besser oder nicht schlechter als ein vorgegebener Schwellenwert (*threshold*) ist. Der Schwellenwert wird dabei im Laufe der Iterationen immer weiter verringert. Im Vergleich zum SA wird beim Threshold Accepting somit nur mit einem Schwellenwert anstelle einer iterationsabhängigen Übernahmewahrscheinlichkeit gearbeitet, was zum einen mit einer Reduzierung des Rechenaufwands einhergeht, zum anderen den Verzicht auf einen Abkühlungsplan ermöglicht (vgl. DUECK & SCHEUER 1990). In der Leistungsfähigkeit ist der TA dem SA jedoch unterlegen (HANSMANN & HOECK 1997). Für weitere Ausführungen zum TA sei auf HANSMANN (2006, S. 360ff.) verwiesen.

### Tabu-Suche

Die Tabu-Suche (TS)<sup>36</sup> von GLOVER (1986, 1989, 1990) ermittelt in einer Nachbarschaftssuche mehrere neue Lösungen, (Züge). Der jeweils beste Zug wird ausgeführt, wobei die Lösung nur mit den anderen Zügen verglichen wird, nicht mit dem Vorgänger. Zur Vermeidung einer Endlosschleife werden die letzten Züge in einer sog. Tabu-Liste gespeichert und für eine festgelegte Zeitspanne verboten. Die Zeitspanne richtet sich nach der Länge der Tabu-Liste, da jeder neu aufgenommene Zug den jeweils ältesten Zug ersetzt (vgl. DELL'AMICO & TRUBIAN 1993; TAILLARD 1994). Auf diese Weise wird ein Herausbrechen aus einem lokalen Optimum ermöglicht. Der speziell für die Anwendung auf das JSSP entwickelte TS-Algorithmus von NOWICKI & SMUTNICKI (1996) wurde aufgrund seiner hohen Leistungsfähigkeit in einer Vielzahl von Arbeiten aufgegriffen und erweitert (vgl. NOWICKI & SMUTNICKI 2005).

### Evolutionäre/Genetische Algorithmen

Die Evolutionären Algorithmen als wichtigste Klasse der Populationssuchverfahren orientieren sich am biologischen Prinzip der Evolution. Innerhalb der Klasse sind für das JSSP vor allem die unabhängig voneinander entstandenen Evolutionsstrategien (ES) von RECHENBERG (1972) und Genetischen Algorithmen (GA) von HOLLAND (1975) von Relevanz. Die Unterschiede liegen vor allem in der Repräsentation der Individuen innerhalb einer Population, die bei den ES als reellwertige Vektoren mit natürlichen Zahlen und bei GA als binäre Vektoren kodiert werden (SCHÖNEBURG ET AL. 1994, S. 219). Weiter werden

---

<sup>35</sup> Dt. Schwellwertakzeptanz.

<sup>36</sup> Engl. Tabu Search oder Taboo Search.

neue Individuen bei den ES über *Mutation* der Elterngeneration, bei GA über problemspezifische *Rekombination* zweier Elternindividuen erzeugt. Die Mutation entspricht dem Vertauschen von Elementen innerhalb eines Chromosoms, bei der Rekombination wird ein Teil eines Chromosoms mit Elementen eines anderen Chromosoms zu einem neuen Chromosom kombiniert. Die Trennung wurde in nachfolgenden Forschungsarbeiten aufgeweicht, sodass Evolutionäre Algorithmen mit reelwertiger Problemrepräsentation ebenfalls als Genetische Algorithmen bezeichnet werden (MICHALEWICZ 1996, S. 9).<sup>37</sup> Dies ist u. a. auf die, im Vergleich mit anderen Reihenfolgeproblemen (z. B. Travelling Salesman Problem, Flow Shop Scheduling Problem) schwierige Genetische Repräsentation des JSSP (vgl. STEININGER 2007, S. 129f.) zurückzuführen, da erfolgreiche GA-Anwendungen aus anderen Bereichen des Operations Research nicht ohne weiteres auf das JSSP übertragen werden können. Eine binäre Repräsentation ermöglicht unzulässige Lösungen (s. Abschnitt 2.2.1.2), die wiederum aufwändige Reparaturalgorithmen erfordert (vgl. NAKANO & YAMADA 1991; VAQUEZ & WHITLEY 2000). Dem entgegen wirken reelwertige Problemrepräsentationen (vgl. BIERWIRTH ET AL. 1993). Aufgrund der fehlenden Trennung in der Literatur wird im Folgenden der Begriff Genetische Algorithmen für alle Evolutionären Algorithmen des JSSP verwendet.

Neben den Mutations- und Rekombinationsoperatoren, auch als Genetische Operatoren bezeichnet, enthält die Beschreibung eines GA zudem Komponenten zur Kodierung und Dekodierung der Lösung in die entsprechende Repräsentationsform sowie Fitnessfunktion, Selektionsstrategie und Akzeptanzmechanismen (SYSWERDA 1991; RIXEN & KOPFER 1994). Darüber hinaus sind das Vorgehen zur Erzeugung der Ausgangspopulation sowie das Abbruchkriterium Bestandteil eines GA (RIXEN & KOPFER 1994).

Nach Erstellung einer Initialpopulation durch Mutation der Ausgangslösung wird die Fitness der einzelnen Individuen berechnet und entsprechende Individuen zur Reproduktion selektiert. Für die Reproduktion werden Paare gebildet, aus denen jeweils durch Rekombination neue Individuen entstehen. Alternativ kann dies auch durch Mutation einzelner Individuen geschehen. Durch den Akzeptanzmechanismus wird selektiert, welche Individuen in die Population übernommen werden. Mit der Fitnessbewertung der neuen Population beginnt die neue Iterationsschleife. Dieser Prozess wiederholt sich solange, bis eine Abbruchbedingung erfüllt wird (vgl. RIXEN & KOPFER 1994).

Seit der ersten Anwendung von Genetischen Algorithmen auf das JSSP durch DAVIS (1985) wurden diese stets weiterentwickelt, z. B. mit dem Ziel der Verspätungsvermeidung (vgl. MATTFELD & BIERWIRTH 2004), mit adaptiven, sich

---

<sup>37</sup> Eine Beschreibung der einzelnen Unterarten findet sich in FELDMANN (1999, S. 71ff.) sowie dem Grundlagenwerk von SIVANANDAM & DEEPA (2008).



gegenseitig ausgleichenden Genetischen Operatoren (vgl. YANG ET AL. 2008) oder der Berücksichtigung alternativer Maschinen (vgl. KÖBERNIK 1999). Eine praktische Anwendung erfolgte u. a. durch ZÄH ET AL. (2004). Neben der alleinigen Lösung des JSSP wurde der GA auch im Rahmen der Produktionsplanung eingesetzt, wo neben dem Scheduling auch die Prozessplanung, d. h. die Generierung der Arbeitspläne sowie die Maschinenauswahl, erfolgte (vgl. HUSBANDS ET AL. 1991; HUSBANDS & MILL 1991; HUSBANDS 1993; SCHULTE 1995).

### **Ant-Colony-Optimisation-Algorithmen**

Die Ant-Colony-Optimization (ACO)-Algorithmen wurden inspiriert vom Futtersuchverhalten natürlicher Ameisen, die durch gemeinsames Agieren und die Ablage von Informationen in Form von Pheromonen sehr schnell den kürzesten Weg zwischen der Futterquelle und ihrem Nest finden (DANNINGER 2012, S. 57f.). Die ACO-Algorithmen selbst wurden erstmals durch DORIGO (vgl. COLORNI ET AL. 1992; DORIGO ET AL. 1996) beschrieben und durch COLORNI ET AL. (1994) auf das JSSP angewendet. Mit der Adaption von BLUM & SAMPELS (2004) wurde das bekannte *FT10*-Problem erstmals durch ACO-Algorithmen gelöst. Dabei lösten sie die Herausforderung der Übertragung des natürlichen Wegoptimierungsproblems auf die Reihenfolgebildung durch die Repräsentationsform der disjunktiven Graphen, auf denen virtuelle Ameisen schrittweise die Reihenfolge der Operationen auswählen und den Weg anhand einer Zielfunktion bewerten. Eine Übersicht über Arbeiten, die den ACO zur Lösung des JSSP anwenden, gibt DANNINGER (2012, S. 73ff.), dessen Arbeit die Lösungsgüte im Vergleich zu bestehenden Ameisenalgorithmen nochmals verbessert. DANNINGER validiert seinen Algorithmus ausschließlich durch Benchmarkinstanzen, praktische Probleme werden hierbei nicht betrachtet. VÖGEL ET AL. (2002) wenden den ACO auf reale Daten eines Industrieunternehmens an, wobei die Ergebnisse denen eines manuellen Scheduling sowie der Nutzung von Prioritätsregeln überlegen ist. Ein zum Vergleich herangezogener Genetischer Algorithmus (GA) übertrifft jedoch dessen Güte. Neben dem Ameisenalgorithmus gibt es noch weitere naturinspirierte Algorithmen zur Lösung des JSSP (z. B. Bee Colony Optimization, vgl. CHONG ET AL. 2006; Particle Swarm Optimization, vgl. XIA & WU 2006; SHA & HSU 2006; ZHANG ET AL. 2009), die aufgrund des ausschließlichen Bezugs auf das theoretische JSSP im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

### **2.2.2.3 Hybride Algorithmen**

Die zur Verbesserung von Lösungsgüte und Rechenzeit entwickelten problemspezifischen Heuristiken sind oftmals eine Kombination verschiedener Lösungsverfahren, weswegen sie auch als hybride Algorithmen bezeichnet werden. Diese

führen häufig zu besseren Ergebnissen als der alleinige Einsatz eines Algorithmus (JAIN & MEERAN 1999).

Eine Vielzahl von Ansätzen nutzt den Genetischen Algorithmus als Metastrategie (vgl. STORER ET AL. 1992a, b; DORNDORF & PESCH 1993; AARTS ET AL. 1994; DORNDORF & PESCH 1995; BIERWIRTH & MATTFELD 1999; GONCALVES ET AL. 2005), indem sie problemspezifische Nachbarschaftssuchen zur Generierung neuer Individuen integrieren. Die Nutzung eines Populationssuchverfahrens als Metastrategie für eine Nachbarschaftssuche wird dabei auch als memetischer Algorithmus bezeichnet (vgl. z. B. GAO ET AL. 2011). HASAN ET AL. (2008) steuern über den GA einfache Operationen im Schedule, während weitere Ansätze (vgl. GONCALVES & RESENDE 2011; TANG ET AL. 2011) auch komplexere Algorithmen in den GA integrieren. Einen Überblick über diese Ansätze geben YAMADA & NAKANO (1997).

TAMILARASI & ANANTHA KUMAR (2010) setzen dagegen in umgekehrter Weise die Genetischen Operatoren in einem Simulated Annealing-Algorithmus zur Erzeugung neuer Lösungen ein. Auch der Shifting-Bottleneck-Algorithmus wird als Metastrategie für Nachbarschaftssuchen verwendet (vgl. BALAS & VAZACOPOULOS 1998; SCHOLZ-REITER ET AL. 2013). Der Giffler-Thompson-Algorithmus (GIFFLER & THOMPSON 1960; s. S. 2.2.2.1) wird aufgrund seiner Fähigkeit, aktive Schedules zu erstellen, häufig in Lösungsalgorithmen für den Scheduling-Prozess integriert (vgl. DORNDORF & PESCH 1993).

### 2.2.2.4 Leistungsvergleich der Lösungsansätze

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Leistungsvergleichen verschiedener Lösungsalgorithmen mittels Benchmarkinstanzen (z. B. AARTS ET AL. 1994 für Nachbarschaftssuchverfahren oder DEMIRKOL ET AL. 1997 für SB-Ansätze). Von Interesse ist dort neben der Lösungsgüte die zugehörige Rechenzeit. Aufgrund der vom Veröffentlichungszeitpunkt abhängige Entwicklungsgrad der Rechenleistung sind die erreichten Zeiten verschiedener Forschungsarbeiten nur schwer vergleichbar. SIEDENTOPF (1995) wies die vergleichsweise kurze Rechenzeit seiner Lösung nach, indem er seine Variante des TA auf einer Rechenstation implementierte, die hinsichtlich der Rechenleistung allen in den Vergleichsarbeiten verwendeten Rechenstationen unterlegen ist.

Gute Ergebnisse erzielen der hybride SB-Algorithmus von BALAS & VAZACOPOULOS (1998) sowie der TS-Algorithmus von NOWICKI & SMUTNICKI (1996) (vgl. SCHUSTER 2003, S. 94). Jüngere Arbeiten wenden vor allem Genetischen Algorithmen mit eingebetteter Nachbarschaftssuche (hybride Algorithmen) an und erzielen sehr gute Ergebnisse (vgl. u. a. GONCALVES ET AL. 2005; GAO ET AL. 2011; PHANDEN ET AL. 2012). Diese Kombination ermöglicht nach YAMADA & NAKANO (1997) erfolgreich die Lösung größerer JSSP.

HOOKE (1995) kritisiert die Vergleiche anhand von Simulationsläufen, da zum einen weitere Einflussfaktoren, wie z. B. eine effiziente Programmierung, die Lösung stark beeinflussen (vgl. auch STEININGER 2007, S. 70f.), zum anderen das Verständnis über die Gründe der Güte eines Algorithmus zu wenig hinterfragt werden. Insbesondere bei Leistungsvergleichen sind zudem die Anpassung von Parameter, die Umsetzung der eigenen Lösung sowie ggf. der Vergleichsansätze kritisch zu sehen. Darüber hinaus hat nach HOOKE (1995) die Wahl der Beispielinstantz einen Einfluss auf die Entwicklung des Algorithmus, da diese meist für einen bestimmten Algorithmus aufgestellt wurden.

Unabhängig vom eingesetzten Verfahren werden in der Literatur auch grundlegende Aspekte zum JSSP sowie deren Lösungsalgorithmen diskutiert. Unstimmigkeit besteht über den Zusammenhang zwischen der Güte der Initiallösung, die bei Nachbarschaftssuchverfahren zwingend erforderlich ist, und der Lösungsgüte und Rechenzeit des Optimierungsergebnisses. Ein Zusammenhang wurde in einigen Arbeiten bestätigt (vgl. APPLGATE & COOK 1991; NOWICKI & SMUTNICKI 1996), andere Arbeiten konnten diesen Zusammenhang für den jeweils behandelten Algorithmus nicht feststellen (vgl. SIEDENTOPF 1995).

SIEDENTOPF (1995) zeigt zudem die Größe des Suchfeldes im JSSP auf. Ein Versuch mit der publizierten Optimallösung des *FT10*-Problems von 930 ZE als Initiallösung mit 500 Optimierungsläufen ergab in 403 Fällen eine unterschiedliche Lösung, die ebenfalls einen Zielfunktionswert von 930 ZE aufweist.

Nach JAIN & MEERAN (1999) sind praktische Reihenfolgeprobleme einfacher zu lösen als Benchmarkinstanzen mit simulierten Werten. Dies ist in der sinkenden Komplexität des Problems, je größer das Verhältnis von Aufträgen zu Maschinen ist, begründet. Insbesondere quadratische Probleme (d. h. Auftragsanzahl entspricht der Maschinenanzahl) sind von hoher Komplexität geprägt (JAIN & MEERAN 1999).

Darüber hinaus kann ein Algorithmus für eine ausgewählte Benchmarkinstanz sehr gut sein, für andere Instanzen, auch bei derselben Größe, hingegen schlechte Lösungen liefern. So benötigen APPLGATE & COOK (1991) für die Optimierung des *LA24*-Problems (10x10) etwa 1000-mal so viele Rechenoperationen wie für das ähnliche *MT10*-Problem (ebenfalls 10x10), obwohl beide dieselbe Komplexität aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass durch hybride Algorithmen, insbesondere durch die Kombination von Genetischen Algorithmen und Nachbarschaftssuchverfahren, gute Lösungen erzielt werden. Der allgemeingültige Vergleich unterschiedlicher Lösungsalgorithmen ist aufgrund o. g. Kriterien nicht möglich, sodass bei der Auswahl und Entwicklung von Algorithmen die Erfüllung der problemspezifischen Anforderungen maßgeblich ist.

### 2.2.3 Dynamisches Scheduling

Das dynamische Scheduling, auch als Rescheduling bezeichnet, findet statt, wenn ein erstellter Plan durch unvorhergesehene Ereignisse unterbrochen wird bzw. aufgrund von Änderungen wie neuer Aufträge oder Maschinenreparaturen zu aktualisieren ist (vgl. FANG ET AL. 1993; KIZILISIK 1999; SUN & XUE 2001; VIEIRA ET AL. 2003; FATTAHI & FALLAHI 2010).

Erstmals wurde dieser Aspekt durch HOLLOWAY & NELSON (1974) in Form von nachträglich veränderten Prozesszeiten betrachtet. VIEIRA ET AL. (2003) definieren Rescheduling als den Prozess der Aktualisierung eines bestehenden Plans aufgrund von Änderungen, wie z. B. das Ankommen neuer Aufträge, Maschinenstörungen oder Reparaturzeiten. Ein zusätzliches Optimierungskriterium ist dabei die Stabilität eines Plans in Form einer Verschiebung der Startzeitpunkte (vgl. FATTAHI & FALLAHI 2010).

OUELHADI & PETROVIC (2009) fassen die Forschung zum Dynamischen Scheduling zusammen und fokussieren sich dabei vor allem auf MAS. Neben dem Lösungsverfahren wird die Art der Reaktion (Reparatur des Plans oder Neuplanung) sowie die Scheduling-Strategie diskutiert. Eine Vielzahl von Ansätzen betrachtet dabei Flexible Fertigungssysteme, da diese besonders von einer schnellen Synchronisation der Planungs- und Ausführungsebene abhängig sind (VIEIRA ET AL. 2003).

Nach VIEIRA ET AL. (2003) sind vor allem die Zeitpunkte des Rescheduling (periodisch oder ereignisorientiert) sowie die Art der Reaktion auf Störungen (Reparatur oder Neuerstellung des Plans) von Relevanz. Da diese Aspekte stark mit dem Störungsmanagement korrelieren und über das JSSP hinausgehen, erfolgt deren detaillierte Diskussion im späteren Abschnitt 2.3.1. SABUNCOUGLU & BAYIZ (2000) zeigen, dass ein Rescheduling unter Nutzung periodischer Optimierungsläufe (Offline-Scheduling) auch bei stochastischen Maschinenausfällen und Engpässen stets bessere Ergebnisse hinsichtlich durchschnittlicher Verspätung und Gesamtdurchlaufzeit erreicht als ein vollständig-reaktives Scheduling unter Nutzung von Prioritätsregeln. Als Lösungsverfahren wird in der Regel ein Genetischer Algorithmus als Metaheuristik angewendet (vgl. FANG ET AL. 1993; FATTAHI & FALLAHI 2010), es kommen aber auch andere Algorithmen zum Einsatz. Darüber hinaus existieren Ansätze, in denen der ungültig gewordene Produktionsplan repariert (vgl. DORN ET AL. 1994; DORN 1995) oder die Ergebnisfindung mittels Anpassungsstrategien zur Einplanung neu eintreffender Aufträge verkürzt wird (vgl. RIXEN 1997, S. 136ff.).

### 2.2.4 Fazit

Die Herausforderung der optimalen Lösung des JSSP hat eine Vielzahl von Lösungsalgorithmen hervorgebracht. Auffällig ist, dass sich diese Arbeiten weit-

gehend auf die theoretische Lösung dieser Probleme beschränken und nur einen geringen Bezug zu praktischen Problemstellungen haben (vgl. MACCARTHY 2006). Dies führt dazu, dass sich die Industrie mit einfachen Heuristiken wie Prioritätsregeln oder Steuerungsverfahren mit einfachen Verfahrensregeln, wie z. B. belastungsabgleichende Verfahren behilft (vgl. SCHERER 1998, S. IX). Insbesondere der SA oder der TA sind nach KÖBERNIK (1999, S. 60) „*trotz guter Ergebnisse bei der Lösung von Benchmarkproblemen noch nicht für die Praxis verfügbar.*“

Dennoch ist zu sehen, dass sich mit einigen Optimierungsverfahren auch große JSSP in kurzer Zeit optimal oder nahezu optimal lösen lassen. Hohes Potenzial haben hier vor allem Metaheuristiken der Nachbarschaftssuche, wie z. B. Genetische Algorithmen. Diese erfordern stets eine Ausgangslösung, was nach EVERS (vgl. 2001, S. 34f.) in vielen Anwendungsfällen der Belegungsplanung zu Problemen führt. Bei der adaptiven Produktionssteuerung ist durch den zugrundeliegenden gestörten Plan hingegen stets eine Ausgangslösung gegeben, sodass sich Iterationsverfahren hier besonders eignen. Weiterhin lässt sich eine Vielzahl an Randbedingungen aus der Praxis in die Algorithmen implementieren. Da diese den Rechenaufwand erhöhen, ist eine Auswahl der geeigneten Verfahren extrem wichtig.

Der Einsatz dieser neueren Lösungsalgorithmen in PPS-Systemen führt zu keiner grundlegenden Änderung in der Architektur, gleichwohl ermöglichen sie, das Teilproblem der Maschinenbelegung auf eine effizientere Art und Weise zu lösen (GARETTI & TAISCH 1999a).

### 2.3 Steuerungsrelevante Problemfelder der Werkstattfertigung

Während die o. g. Arbeiten zur Verbesserung der Werkstattfertigung mittels prädiktiv-reaktivem Scheduling vor allem den in Abschnitt 1.3 aufgeführten Aspekt der fehlenden Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufs zum Schwerpunkt hatte, werden im Folgenden Forschungsarbeiten aufgeführt, die sich mit weiteren Aspekten der Problemstellung dieser Arbeit befassen. Die ungeeignete Reaktion auf Störungen und Planabweichungen teilt sich in das Themenfeld Störungsidentifikation und -management (Abschnitt 2.3.1) sowie Zielgrößen zur Bewertung von Entscheidungsalternativen (Abschnitt 2.3.2) auf. Darüber hinaus wird mit den in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Ansätzen zur Verbesserung der Datenerfassung auf den hohen Zeitverzug in der Rückmeldung von Betriebsdaten Bezug genommen.

### 2.3.1 Störungsidentifikation und -management

Neben den in Abschnitt 2.1 aufgeführten Ansätzen zur Verbesserung der Werkstattsteuerung befasst sich eine Vielzahl von Arbeiten ausschließlich mit dem Management von Störungen, was nach BELZ (1993, S. 3) eine Kernaufgabe der Produktionssteuerung ist. Nach einer einführenden Definition der Begriffe Störung und Störungsmanagement wird ein Überblick über Ansätze zur Klassifizierung von Störungen sowie Reaktionsstrategien und -möglichkeiten gegeben. Systeme zum Störungsmanagement, die sich ausschließlich auf Produktmerkmale (Fehler, Nacharbeit) beziehen (z. B. OSTGATHE 2012), werden im Folgenden nicht betrachtet, da diese nur einen geringen Anteil der möglichen Störungen betrachten und somit nicht zur ganzheitlichen Werkstattsteuerung beitragen (vgl. Abschnitt 1.4.2).

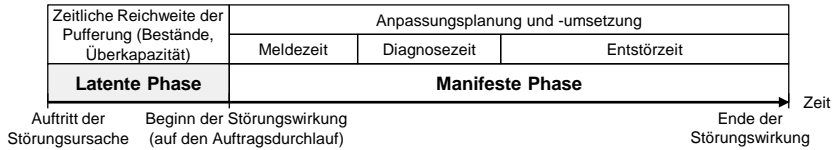
#### 2.3.1.1 Definitionen

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen von Störungen im Produktionskontext, die im Wesentlichen das unvorhergesehene und unerwartete Eintreten der Störung (vgl. REFA 1985, S. 424; CORSTEN & GÖSSINGER 1997, S. 3; PATIG 2001, S. 11), das sich in Form von „*Abweichungen vom geplanten Verlauf*“ (KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 110; vgl. auch REFA 1985, S. 424; LEHMANN 1992, S. 9; PATIG 2001, S. 11) auswirkt. Die daraus entstehenden Produktionssituationen stellen gegenüber dem störungsfreien Zustand eine Schlechterstellung dar (HEIL 1994; CORSTEN & GÖSSINGER 1997, S. 3).

Im Rahmen dieser Arbeit ist daher eine Störung als eine Abweichung zwischen Plan- und Soll-Werten mit Auswirkungen auf den weiteren Fertigungsverlauf definiert (vgl. GREVE 1970, S. 27; SCHNEEWEISS 1988; EVERSHEIM 1992, S. 11). Die Abweichung kann in seltenen Fällen auch eine Verbesserung bedeuten.

Als Reaktion auf die Störungen unterscheidet EVERSHEIM (1992, S. 12) zwischen der Störungsbehebung, von PATIG (2001, S. 14) auch als Störungsbewältigung bezeichnet, der Störungsfolgenminimierung und der Störungsvermeidung. Kriterium ist dabei der Zeithorizont, so dass diese Reaktionen auch als „*kurz-, mittel- und langfristiges Störungsmanagement*“ bezeichnet werden (EVERSHEIM 1992, S. 12). Das Störungsmanagement ist dabei als „*Aufbau- und Ablauforganisation aller aufeinanderfolgenden Maßnahmen [...]*“ definiert (EVERSHEIM 1992, S. 12). Im Gegensatz zur Störungsfrüherkennung (z. B. Frühwarnsysteme, vgl. GENÇ 2015) setzt das kurzfristige Störmanagement in der manifesten Phase der Störung an (vgl. Abb. 2.6), bei der die Auswirkungen einer Störung sichtbar werden und eine Reaktion gefordert ist.

Als notwendige Daten sind dabei der Beginn und das Ende einer Störung sowie die Beschreibung des Sachverhaltes zu erfassen und festzuhalten (vgl. REFA 1985, S. 400). Voraussetzung für die Behebung ist die Analyse der



**Abb. 2.6:** Phasen des Störverlaufs (nach FISCHÄDER 2007, S. 30)

Störung sowie eine vorhergehende Klassifizierung (REFA 1985, S. 421). Daher werden im Folgenden Ansätze zur Klassifizierung von Störungen betrachtet.

### 2.3.1.2 Klassifizierung von Störungen in der Werkstattfertigung

Die Vielzahl an möglichen Störungen erfordert deren Gliederung in Störungsklassen<sup>38</sup>, um zielgerichtete Maßnahmen ableiten zu können. Die Klassifizierung kann dabei nach *Ursache*, *Wirkung*, *Auftretenswahrscheinlichkeit* sowie der *Differenzierung einzelner Störungen* erfolgen.

Ein Großteil der Arbeiten systematisiert die Störungen nach ihrer Ursache (vgl. HEIL 1994, S. 85). Die Einteilung erfolgt dabei meist anhand der Produktionsfaktoren nach GUTENBERG (1955) (vgl. LEHMANN 1992, S. 10; SCHWARTZ 2004, S. 72) oder einer Abwandlung davon (vgl. ZÄPFEL 1981, S. 243ff.; ROSE 1989, S. 5f.; vgl. BURGER 1992, S. 63; BELZ 1993, S. 24ff.). Zudem wird unterschieden, ob die Störungen innerhalb oder außerhalb der betrieblichen Struktur entstanden sind (GREVE 1970, S. 64ff.; REFA 1985, S. 424; HEIL 1994, S. 87ff.). Weiterhin wird zwischen dem erstmaligen Auftreten einer Störung (Primärstörung) und Folgestörungen (Sekundärstörung bzw. induzierte Störung, vgl. GREVE 1970, S. 64ff.; REFA 1985, S. 426f.; SCHNEEWEISS 1988) differenziert. Die ursachenbezogene Klassifizierung eignet sich zur Vermeidung des Wiederauftretens von Störungen im mittel- bis langfristigen Störungsmanagement.

Ein weiterer Klassifizierungsansatz ist die Systematisierung nach den Auswirkungen von Störungen. Auch hier ist die Klassifizierung häufig an die Produktionsfaktoren von GUTENBERG angelehnt (vgl. PATIG 2001, S. 12; COWLING & JOHANSSON 2002), wobei BRACKEL (2009, S. 36) diese um eine Störungsklasse, die „sich auf Abweichungen zwischen geschätzten und aktuellen Daten wie zum Beispiel Bearbeitungsdauern oder Reparaturzeiten“ bezieht, ergänzt. SCHUH ET AL. (2014a) klassifizieren Abweichungen nach deren Wirkung auf Elemente des Produktionsplans. So können die Abweichungen die Arbeitsstation bzw.

<sup>38</sup> PATIG (2001, S. 12) definiert eine Störungsklasse als „Menge von Störungen [...], deren Auswirkungen in gleichartigen Abweichungen zwischen Ist- und Plan-Werten bestehen.“

Maschine, die Start- und Endtermine einer Operation, deren Dauer, die Auftragsreihenfolge oder die Menge des Outputs betreffen. Diese Abweichungen werden dabei auf elf typische Störungen der Werkstattfertigung zurückgeführt. Die Systemfähigkeiten zur Reaktion betrachtet SCHMITT (1989, S. 77) mit der Unterscheidung zwischen neutralen Störungen, deren Auswirkungen durch die Pufferzeit abgefangen werden sowie verändernde Störungen, die sich auf Folgeaufträge auswirken. Diese Klassifizierung eignet sich zur Analyse der Störungswirkung, um entsprechende Maßnahmen zur Störungsvermeidung zu priorisieren.

Da ein Großteil der betrieblichen Störungen stochastisch und ungeplant auftreten (vgl. EVERSHEIM & SCHÄFER 1980), können diese nach der Häufigkeit und Verteilung ihres Auftretens (vgl. SCHÄFER 1980, S. 25) sowie dem Grad der Wahrscheinlichkeit des Störeintritts (vgl. BORMANN 1978, S. 44f.) klassifiziert werden. Ergänzend dazu kann nach der Vermeidbarkeit bzw. Beeinflussbarkeit von Störungen sowie deren Schwere unterschieden werden (vgl. GREVE 1970, S. 137f.; SCHNEEWEISS 1988; EVERSHEIM 1992, S. 44; BRACKEL 2009, S. 27). Diese Art von Störungsklassifizierung eignet sich u. a. zur Gestaltung des Störungsmanagements, da zielgerichtet eine Auswahl der zu beachtenden Störungen getroffen werden kann.

Die Entwicklung von wissensbasierten Systemen zur Produktionsregelung (s. Abschnitt 2.1.1) erfordert eine Differenzierung von Störungen, um entsprechende Maßnahmen regelbasiert ableiten zu können. Dies wird meistens durch eine abschließende Bestimmung der betrachteten Störungen realisiert (vgl. ARPING 1977, S. 101ff.; WEINBRECHT 1993, S. 44; VIEIRA ET AL. 2003; SCHWARTZ 2004, S. 149). Betrachtungsgegenstand sind dabei vor allem Ausfälle von Maschinen und Personal, Eilaufträge, Ausschuss/Nacharbeit, auftragsbezogene Störungen sowie Abweichungen in Zeiten und Terminen. Eine Übersicht geben VIEIRA ET AL. (2003). Die Einzelbetrachtung von Störungen ermöglicht eine einfache Entwicklung von zielgerichteten Reaktionsmaßnahmen. Eine umfassende Betrachtung aller relevanten Störungen kann dagegen nicht auf diese Weise erfolgen, da in der Praxis unvorhergesehene Störungen auftreten können, die durch ein regelbasiertes System nicht bearbeitet werden können.

### 2.3.1.3 Strategien des Störungsmanagements

Die geeignete Reaktion auf Störungen im Auftragsdurchlauf erfordert neben der Klassifizierung auch adäquate Reaktionsstrategien, mit denen der zugrundeliegende Produktionsplan an die neue Situation adaptiert wird. Dabei wird im Hinblick auf die Häufigkeit und den Grad der Anpassung zwischen prädiktiven, reaktiven und proaktiven Scheduling unterschieden (SZELKE & MONOSTORI 1999, S. 65). Das *prädiktive Scheduling* geht von einer statischen Planungsumgebung aus, so dass mögliche Störungen nicht berücksichtigt (SAUER 2002, S. 12) bzw. in der Praxis ohne Rückkopplung zum Produktionsplan (z. B. Steuerung



durch Meister und Terminjäger, vgl. Abschnitt 1.2.2.2) aufgefangen werden. Dagegen wird bei der Strategie des *reaktiven Scheduling* der zugrundeliegende Plan an die neue Situation angepasst, sobald eintretende Störungen dies erfordern (vgl. DORN ET AL. 1994, S. 52; HENSELER 1998, S. 37; SAUER 2002, S. 17f.). Die in Abschnitt 2.1.1 eingeführten Steuerungsstrategien des vollständig-reaktiven Scheduling sowie des prädiktiv-reaktiven Scheduling sind aus dem reaktiven Scheduling abgeleitet. Als dritte Strategie setzt das *proaktive Scheduling* auf die Vermeidung jeglicher Art von Maßnahmen, indem ein robuster (d. h. wenig störanfälliger) Ablaufplan erzeugt wird (BRACKEL 2009, S. 38). In diese Strategie sind auch die Konzepte der opportunistischen Terminierung (vgl. NITTKA 1996, S. 78; CORSTEN & GÖSSINGER 1997, S. 12ff.; PATIG 2001, S. 15), des antizipativen Störungsmanagements (vgl. PATIG 2001, S. 15) sowie der stochastischen Umdisposition (NITTKA 1996, S. 78) einzuordnen.

Für die adaptive Produktionssteuerung eignet sich dabei ausschließlich die Strategie des reaktiven Scheduling, da nur dort eine zeitnahe Anpassung des zugrundeliegenden Plans an die neue Situation erfolgt und somit eine Übereinstimmung zwischen Plan- und Ist-Situation herbeigeführt wird. Durch proaktives Scheduling werden zwar die Störungsauswirkungen minimiert, bei extremer Ausprägung der Störung wird ein solcher Plan jedoch ebenfalls ungültig. Zudem werden beim proaktiven Scheduling stets Leerzeiten eingeplant, was bei fehlendem Eintreten der entsprechenden Störung für ungenutzte Kapazitäten und somit für Verschwendung im Produktionsprozess sorgt. Weitere Strategien wie z. B. die Störungsprävention durch Behebung der Störungsursachen (vgl. BORMANN 1978, S. 84ff.; SCHÄFER 1980; REFA 1985, S. 421) werden hier nicht betrachtet, da sie keinen Bezug zur Produktionssteuerung haben.

Hinsichtlich der zeitlichen Reaktion wird in der Literatur zwischen der *periodischen Strategie*, bei der nach Ablauf einer vorbestimmten Periode ein Rescheduling stattfindet (vgl. SABUNCOUGLU & BAYIZ 2000), und der *ereignisgesteuerten Strategie*, bei der die Reaktion durch das Eintreten eines störenden Ereignisses ausgelöst wird (vgl. JOSTOCK & BLEY 1994), unterschieden. Hinsichtlich der Leistung eines Produktionssystems erzielt die ereignisgesteuerte Strategie wesentlich bessere Ergebnisse, es besteht allerdings die Gefahr, dass bei hohem Störaufkommen ständig neue Pläne generiert werden und somit eine hohe Nervosität im System entsteht (CHURCH & USZOY 1992). Die hybride Strategie (vgl. VIEIRA ET AL. 2003) wirkt diesem durch Kombination der beiden Varianten entgegen.

### 2.3.1.4 Methoden der reaktiven Planung

Innerhalb der Strategie der reaktiven Planung existieren verschiedene Methoden zur Ausgestaltung, deren Stand der Technik im Folgenden kurz dargestellt wird. Dabei sind nach ROSE (1989, S. 8) und SCHMITT (1989, S. 76f.) folgende Aufgaben von Relevanz:

- *Abweichungserkennung*: Vergleich von Planwerten mit aktuellen Rückmeldedaten (z. B. Auftragsfortschritt, Störungsmeldungen) zur Erkennung von Abweichungen.
- *Abweichungsbeurteilung*: Berechnung bzw. Simulation der Folgewirkungen und Beurteilung der Situation.
- *Abweichungsbeseitigung*: Anwendung von problemorientierten Strategien und/oder Einleitung einer Teil-, Um- oder Neuplanung.

Die Reaktion der Abweichungsbeseitigung erfolgt gemäß REFA (1985, S. 419f.) als Eingriff in die laufende Aufgabendurchführung oder als Planänderung. Eingriffe sind als „*Anpassen der Ist-Daten an die Soll-Daten*“ und Planänderung als „*Anpassen der Soll-Daten an die Ist-Daten*“ definiert. Erstere sind kurzfristige Maßnahmen des Werkers, die laufend im Rahmen der Werkstattsteuerung vorkommen, letztere haben den Charakter einer Plankorrektur. Im Folgenden wird daher die Planänderung weiter betrachtet.

Bei der Störungsbehebung wird zwischen zwei Vorgehensweisen differenziert. Zum einen kann beim Eintreten einer Störung der komplette Ablaufplan unter Berücksichtigung der aktuellen Informationen verworfen und neu generiert werden (Neuplanung), zum anderen kann der ursprüngliche Plan partiell adaptiert bzw. repariert und somit weiterverwendet werden (Umplanung, vgl. SABUNCOUGLU & BAYIZ 2000). Die Neuplanung ermöglicht das Finden der optimalen Lösung für das Problem unter den geänderten Randbedingungen, gleichzeitig erhöht das häufige Verwerfen des Produktionsplans die Nervosität des Systems und erschwert die Implementierung des neuen Produktionsplans (vgl. CURRY & PETERS 2005).

Eine Alternative sind daher Methoden, die den Ausgangsplan bei ihrer Anwendung mit einbeziehen. Eine konkrete Form der Reparatur eines Produktionsplans ist das sog. Match-up Scheduling (vgl. BEAN ET AL. 1991; AKTURK & GORGULU 1999; MORATORI ET AL. 2008; bzw. nach NITTKA 1996, S. 78, Turnpike-Scheduling genannt). Dabei wird eine Neuplanung der Arbeitsvorgänge nur in dem Zeitraum vom Auftreten der Störung bis zum sogenannten Match-up Point, ab dem wieder auf den ursprünglichen Produktionsplan zurückgegriffen wird, vorgenommen. Hinsichtlich der Zielerreichung liefert dieses Verfahren vergleichbare Werte wie eine vollständige Neuplanung, gleichzeitig wird aber eine Stabilität erreicht, wie es auch beim Right-Shifting der Fall ist (vgl. MORATORI ET AL. 2008). Right-Shifting bezeichnet ein Reparaturverfahren, bei dem alle von der Störung betroffenen Arbeitsvorgänge auf der Zeitachse „nach rechts“ verschoben (d. h. verspätet) werden, bis wieder ein gültiger Produktionsplan erreicht ist (vgl. BRACKEL 2009, S. 42). Ein ähnliches Vorgehen ist das Net-Change-Verfahren, bei dem die weitestgehende Beibehaltung des Plans bei partieller Neuplanung in gestörten Bereichen angestrebt wird (vgl. NITTKA 1996, S. 78).

Darüber hinaus existieren im Themenfeld der Umlanung eine Vielzahl von Maßnahmen zur Veränderung der Kapazitätsnachfrage oder des Kapazitätsangebots (PATIG 2001, S. 20). Die wichtigsten Maßnahmen sind anhand des Gantt-Diagramms in Abb. 2.7 dargestellt.

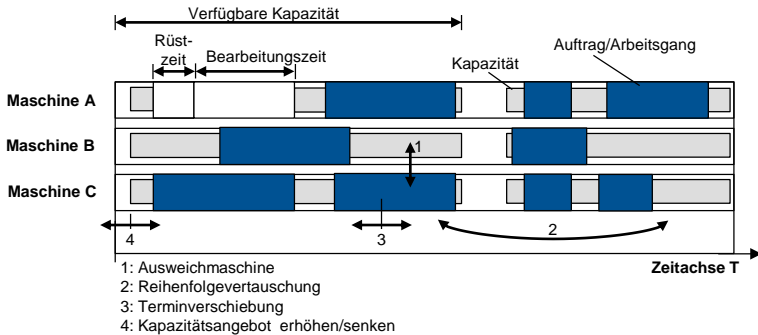


Abb. 2.7: Parameter und Stellgrößen der Maschinenbelegung am Gantt-Diagramm (ZETLMAYER 1994, S. 36)

Die Kapazitätsnachfrage kann terminlich (Anpassung der Start- und Endtermine ohne oder mit Änderung der Reihenfolge), quantitativ (z. B. Alternativressourcen) oder qualitativ (Lossplittung, vgl. ROSE 1989, S. 93; Losteilung, vgl. ZÄPFEL 1981, S. 230) verändert werden, während die Veränderung des Kapazitätsangebots der Kapazitätssteuerung im PPS-Modell nach LÖDDING (2008, S. 5f.) entspricht und qualitative und quantitative Maßnahmen zur Erhöhung (bzw. Verringerung) der Anzahl sowie Intensität von Ressourcen umfasst.

Unter den in Abb. 2.7 durch ZETLMAYER (1994, S. 36) aufgeführten Stellgrößen *Ausweichmaschine*, *Reihenfolgevertauschung*, *Terminverschiebung* sowie *Senkung/Erhöhung des Kapazitätsangebots* sind in der Literatur noch weitere Ausprägungen zu finden (vgl. auch Übersicht von CORSTEN & GÖSSINGER 1997, S. 8f.). Bei der Reihenfolgevertauschung unterscheidet WEINBRECHT (1993, S. 85ff.) zwischen dem Vertauschen von zwei Arbeitsgängen und dem Vorziehen des Warteschlangennachfolgers. Letzteres ist eine Maßnahme, die lokal an einer Arbeitsstation erfolgen kann. Größere, globale Aktionen wie das Verschieben eines Arbeitsvorgangs bzw. Auftrags über mehrere Arbeitsvorgänge hinweg wird dagegen von WEINBRECHT nicht in Betracht gezogen. Innerhalb der Terminverschiebung ist das Überlappen eines Arbeitsvorgangs mit Vorgänger- oder Nachfolger-Arbeitsvorgängen zu verorten, was zu einer Beschleunigung des Auftragsdurchlaufs führt (vgl. WEINBRECHT 1993, S. 85ff.; KREIMEIER 1987, S. 143), ebenso wie das Verschieben der extern vorgegebenen Fertigstellungstermine (LEE ET AL. 1996). Die Stellgröße *Ausweichmaschine* prägt sich in Form einer Kompletterverlagerung eines Auftrags auf eine Alternativmaschine (vgl.

KREIMEIER 1987, S. 143; BECKENDORFF 1991, S. 88; WEINBRECHT 1993, S. 85ff.; LEE ET AL. 1996) oder einer Teilverlagerung (Splitten, vgl. WEINBRECHT 1993, S. 85ff.) aus. Darüber hinaus führt BECKENDORFF (1991, S. 88) das Ausweichen auf alternative Verrichtungen auf, bei dem nicht nur die Maschine, sondern auch die darauf ausgeführten Aktivitäten bzw. Aktivitätsfolgen wechseln.

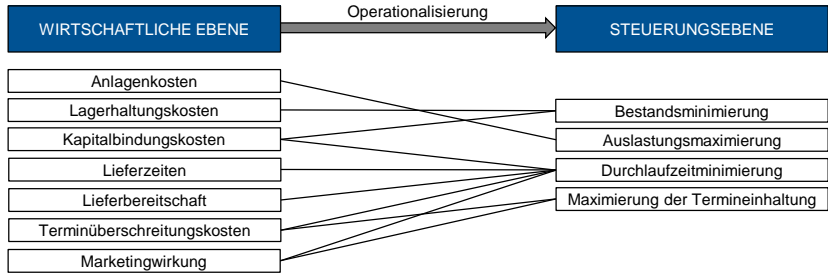
Insgesamt ist durch die Arbeiten im Themenfeld des Störungsmanagements die Grundlage für die Entwicklung eines adaptiven Werkstattsteuerungssystems geschaffen worden. Das größte Potenzial, zielgerichtet auf Störungen zu reagieren, bietet die reaktive Planung mit den zugehörigen Methoden. Defizite bestehen in der Definition der Störungsklassen, da bestehende Ansätze entweder keine klassenbezogene Ableitung von Maßnahmen ermöglichen oder die möglichen Fehler nicht umfassend beschreiben. Potenzial bietet der wirkungsbezogene Ansatz auf Basis des Produktionsplans von SCHUH ET AL. (2007). Dieser erfordert aber eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Verbindung von messbaren Störungsauswirkungen und den entsprechenden Maßnahmen. Ein Ansatz zur Vermeidung der Planungsnervosität ist das Match-Up Scheduling, wobei der Aufwand zur Rückführung auf den alten Plan zu hinterfragen ist, wenn zum einen in recht kurzen Perioden eine komplette Neuplanung aufgrund geänderter Randbedingungen stattfindet (z. B. aufgrund neu hinzugekommener Aufträge), zum anderen durch häufige Störungen eine Durchsetzung des ursprünglichen Plans auch nach der Rückkehr unwahrscheinlich ist.

### 2.3.2 Bewertung von Produktionsplanalternativen

Jede Änderung am zugrundeliegenden Ablaufplan (z. B. aufgrund von Störungen) erfordert eine Bewertung hinsichtlich eines vorher festgelegten Kriteriums, um den Erfolg der Maßnahme bzw. die Güte des Plans zu bestimmen und ggf. Alternativen abzuwägen (vgl. ASHOUR 1972, S. 34). Maßgeblich sind dabei die Zielgrößen der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 1.2.2.1), deren Zusammenhang zu den wirtschaftlichen Zielsetzungen des Unternehmens durch WIENDAHL & WEDEMAYER (1990) aufgezeigt wird (s. Abb. 2.8).

Aufgrund der Schwierigkeit der Kompromissfindung zwischen diesen Zielgrößen (vgl. Abschnitt 1.2.2.1) existiert in der Literatur eine Vielzahl von mono- und multikriteriellen Ansätzen. Letztere verrechnen die einzelnen Kriterien gewichtet oder ungewichtet zu einem Zielwert (ASHOUR 1972, S. 38f.). Insbesondere die Betrachtung verschiedener Kriterien unterschiedlicher Dimension erhöht aufgrund der oft gegensätzlichen Zielkriterien (vgl. Abschnitt 1.2.2.1) die Komplexität der Bewertung enorm. Auf die multikriterielle Bewertung wird daher am Ende dieses Abschnitts eingegangen.

Unabhängig vom Bewertungskriterium besteht die Notwendigkeit einer messbaren Datenbasis. Eine Übersicht über Kennzahlen auf Basis maschinell erfassbarer Daten geben u. a. HILDEBRAND & MERTENS (1992, S. 7ff.). Nach SCHULTZ



**Abb. 2.8:** Umsetzung wirtschaftlicher Zielgrößen in den Zielsetzungen der Fertigungssteuerung (WIENDAHL & WEDEMAYER 1990, S. 408)

& MERTENS (2000) lassen sich die Kennzahlen zur Bewertung von Produktionsplänen in monetäre und nicht-monetäre Kennzahlen unterscheiden. Innerhalb der nicht-monetären Kennzahlen werden neben zeitbezogenen Kriterien auch Verhältniskennzahlen (z. B. Termintreue, Kapazitätsauslastung) herangezogen. Die unterschiedlichen Zielgrößen werden im Folgenden kurz dargestellt.

### Zeitbezogene Bewertungskriterien

Die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit ist das häufigste Zielkriterium bei der Optimierung der Maschinenbelegungsplanung (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Außer dem Starttermin des ersten Arbeitsvorgangs sowie dem Fertigstellungstermin des letzten Arbeitsvorgangs werden keine weiteren Daten zur Berechnung benötigt. Daraus resultiert, dass die Fertigstellungszeitpunkte aller weiteren Aufträge keine Berücksichtigung in der Zielfunktion finden (SIEGEL 1973, S. 28f.). Praktische Relevanz hat eine Steuerung zur Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit nur, wenn die produzierten Einheiten erst nach Fertigstellung als Ganzes weitergenutzt werden können (vgl. DICKHUT 1966, S. 67; SIEGEL 1973, S. 28f.).

Dagegen bezieht sich die mittlere Durchlaufzeit auf alle betrachteten Aufträge und führt bei dessen Minimierung zu Produktionsplänen mit kurzen Auftragsdurchlaufzeiten. Dies resultiert in niedrigen Beständen und somit geringen Kapitalbindungskosten sowie kurzen Lieferzeiten (DANNINGER 2012, S. 207).

Eine weitere Möglichkeit der zeitbezogenen Bewertung ist die Minimierung einer Zielfunktion aus unproduktiven zeitbezogenen Größen, wie Wartezeiten, Maschinenleerzeiten, Terminüberschreitungzeiten und Umrüstzeiten, die auch untereinander gewichtet werden können (vgl. ASHOUR 1972, S. 34ff.). Dadurch wird die Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien (z. B. Auslastung und Termintreue) bei Beibehaltung der Zeitdimension ermöglicht.

### **Termintreue**

Vor dem Hintergrund kurzfristig fälliger Liefertermine wird häufig die Abweichung vom Zieltermin als alleiniges Kriterium angewendet. Dabei kann entweder die Summe aller Terminabweichungen oder, wenn große Terminabweichungen stärker zu gewichten sind, die Summe aller quadrierten Terminabweichungen herangezogen werden. Darüber hinaus ermöglicht das Potenzieren von Verspätungen eine stärkere Gewichtung gegenüber Verfrühungen, wenn letztere linear betrachtet werden (vgl. SCHALLER 2004).

### **Kapazitätsauslastung**

Die Maximierung der Kapazitätsauslastung erfordert eine maschinenbezogene Zielfunktion, die die Gesamtbearbeitungszeit einer bzw. aller Maschinen zur Gesamtbelegungszeit (Gesamtbearbeitungszeit + Gesamtleezeit) setzt (NEIDHARDT 2007, S. 48f.). Da die Gesamtbearbeitungszeit fix vorgegeben ist und somit im Rahmen der Maschinenbelegung nur die Leerzeiten variiert werden, kann die Kapazitätsauslastung äquivalent als Minimierung der Ziele Gesamtbelegungszeit, mittlere Belegungszeit, Gesamtleezeit oder mittlere Leerzeit ausgedrückt und somit zeitlich bewertet werden (NEIDHARDT 2007, S. 48). Aufgrund der Vergleichbarkeit darf sich die Bezugsgröße nicht ändern, sodass kapazitätsorientierte Ziele wie auch die Termintreue nur bei statischen Reihenfolgeproblemen betrachtet werden (vgl. NEIDHARDT 2007, S. 48).

### **Sonstige nicht-monetäre Kriterien**

Neben Zeitgrößen sowie der Termintreue und Kapazitätsauslastung existieren vereinzelt weitere nicht-monetäre Kriterien, die im Regelfall nicht als alleiniges Zielkriterium herangezogen werden, wie z. B. der Bestand (WIENDAHL & WEDEMAYER 1990; SIMON 1995, S. 61) oder die Leistung eines Fertigungssystems (SIMON 1995, S. 61). Eine Zusammenstellung verschiedener nicht-monetärer Kriterien zur Bewertung von Produktionsplänen geben STRICKER ET AL. (2014).

### **Monetäre Kriterien**

Nach MENSCH (1968, S. 47) ist die eine Produktionsplanalternative nach einem ökonomisch rationalen Kriterium auszuwählen, um die jeweils wirtschaftlichste Lösung zu erhalten. Zeitkriterien erfüllen diese Anforderungen nicht, da sie nicht alle Faktoren berücksichtigen, die Einfluss auf den Unternehmensgewinn haben (z. B. vom zeitlichen Aufwand entkoppelte Zusatzkosten beim Rüsten oder kundenabhängige Vertragsstrafen bei Verspätung). Bei monetären Kriterien werden dagegen alle Faktoren berücksichtigt, die Erlöse einbringen oder schmälern sowie Kosten verursachen (vgl. MENSCH 1968, S. 47f.).

PAULIK (1984, S. 137ff.) fasst den damaligen Stand der Technik ökonomisch orientierter Zielsetzungen für die Reihenfolgeplanung zusammen. Diese lassen

sich in reihenfolgeabhängige Kostenbestandteile (vgl. AGGARWAL ET AL. 1973), wie z. B. Rüstkosten oder Terminüberschreitungskosten, und der wertorientierten Betrachtung zeitlicher Faktoren (vgl. MENSCH 1968; ASHOUR 1972; SIEGEL 1973) klassifizieren. Letztere werden von ACKER (2011, S. 27) auch als indirekte Kostenminimierung „über die Extremierung von zeit- und kapazitätsorientierten Zielen“ bezeichnet. Die Betrachtung von Erlösen findet nicht statt, da das Produktionsprogramm die Erlöse determiniert und diese einen fixen Block ohne Abhängigkeit von der Auftragsfolge darstellen. Somit kann eine Gewinnmaximierung nur durch eine Minimierung der ablaufabhängigen Kosten erfolgen (vgl. MENSCH 1968, S. 48; SIEGEL 1973, S. 27). Nach ASHOUR (1972, S. 38) ist die Minimierung der Gesamtkosten das meistverbreitete Zielkriterium in praktisch eingesetzten Systemen. Wertorientierte Kriterien wie z. B. der zu erwartende Gewinn (vgl. HOFFMANN & SCUDDER 1983) sind aufgrund des fehlenden Reihenfolgebezugs kritisch zu sehen (vgl. PAULIK 1984, S. 139).

Die betrachteten Kostenbestandteile verschiedener Ansätze sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Neben Steuerungsansätzen werden dabei auch Ansätze zur Ablaufplanung, jeweils nach Werkstattfertigung und FFS unterschieden, sowie Ansätze zur Lösung eines um Kostenaspekte erweitertes JSSP betrachtet.

Obwohl einige Kostenbestandteile wie Kapitalbindungskosten, Rüstkosten oder Verspätungskosten häufig betrachtet werden, ist keine allgemeingültige Ableitung einer reihenfolgeabhängigen Kostenfunktion möglich.

Grundsätzlich ermöglicht die Bewertung durch eine Kostenfunktion die Berücksichtigung einer Vielzahl von Optimierungszielen. Das Problem der Abwägung gegenläufiger Zielgrößen wird wesentlich vereinfacht, da durch die Kosten eine Gewichtung der einzelnen Ziele gegeneinander erfolgt (vgl. PRITSCHOW & BRINZER 2002; BRINZER 2005, S. 89). Somit ist z. B. quantifizierbar, ob ein zusätzlicher Rüstvorgang zur Vermeidung einer Auftragsverspätung durchgeführt oder vermieden werden sollte. Der Freiheitsgrad zur Kostenbeeinflussung ist nach STADTLER (2015, S. 203) auf dieser Ebene zwar gering, dennoch können auf diese Art unterschiedliche Abläufe (z. B. Eilaufträge oder Standardaufträge) monetär bewertet werden. Des Weiteren ist durch eine Kostenbetrachtung auch die Modellierung von weichen Faktoren, wie z. B. ein langfristiger Vertrauensverlust des Kunden bei häufigen Verspätungen, möglich.

Die Quantifizierung der reihenfolgeabhängigen Kosten gelingt in der Praxis oft nur schwer, sodass stattdessen auf die o. g. zeitlichen Kriterien zurückgegriffen wird (vgl. SCHULTZ & MERTENS 2000; NEIDHARDT 2007, S. 40; ACKER 2011, S. 27). ARPING (1977, S. 90f.) empfiehlt ebenfalls die Nutzung von Kosten als Zielgröße für Steuerungsentscheidungen, argumentiert jedoch, dass das Anstreben der Termineinhaltung die weiteren kostenrelevanten Größen Durchlaufzeiten und Kapazitätsauslastung ebenfalls positiv beeinflusst. Dies ist in





tieren weitere Verfahren, die eine Berechnung von Lösungen unterschiedlicher Zielsetzung ermöglichen.

Das Ergebnis einer multikriteriellen Zielfunktion ist eine Menge an pareto-optimalen Lösungen, d. h. es gibt keine Lösung, bei der ein Kriterium verbessert wird, ohne mindestens ein anderes Kriterium zu verschlechtern (vgl. TANGOUR & SAAD 2006). Die Auswahl einer möglichst optimalen Lösung aus der pareto-optimalen Lösungsmenge erfordert eine Priorisierung der Ziele. Für die Prioritätensetzung der Lösungsmenge gibt es eine Vielzahl an Methoden, die nach dem Zeitpunkt der Prioritätensetzung in a-priori- und a-posteriori-Methoden eingeteilt werden (vgl. MIETTINEN 2008, S. 3).

Bei den a-priori-Methoden erfolgt die Festlegung der Präferenzen vor der Lösung der Zielfunktion. Klassische a-priori-Methoden sind u. a. die lexikografische Ordnung (vgl. GRAVEL ET AL. 2002; SAWIK 2007), die Methode der Zielgewichtung (vgl. SPENGLER ET AL. 1996) oder die Zielprogrammierung (vgl. DECKRO ET AL. 1982; SPENGLER ET AL. 1996). Die Zielprogrammierung nach SPENGLER ET AL. (1996) ermöglicht die Berücksichtigung von multidimensionalen Zielkriterien durch die Betrachtung als prozentuale Annäherung an den Idealzustand und somit eine dimensionslose Betrachtung. Dieser Ansatz wurde u. a. auch von WIENDAHL & WEDEMAYER (1990) und SIMON (1995, S. 61) gewählt. Dabei nutzt SIMON einen Gewichtungsfaktor für die Einzelziele, der dabei die Berücksichtigung unterschiedlicher Fertigungssituationen (z. B. Auslastung wird bei Engpassmaschine höher gewichtet) ermöglicht.

Bei den a-posteriori-Methoden erfolgt die Auswahl anhand gewählter Präferenzen erst, nachdem die Zielfunktion gelöst wurde. So werden z. B. bei der  $\varepsilon$ -constraint-Methode (vgl. AMELI ET AL. 2008) alle Zielfunktionen bis auf eine als Nebenbedingungen formuliert, indem jeweils eine obere Schranke für den Zielfunktionswert festgelegt wird (MIETTINEN 2008, S. 12). Interaktive Methoden beziehen den Entscheidungsträger mit in die Lösungsauswahl ein, indem dieser den Lösungsraum mit jedem Schritt weiter einschränkt. So kann der Entscheidungsträger z. B. mittels Step Method (STEM, vgl. BENAYOUN ET AL. 1971) sukzessiv für jede der Zielfunktionen eine Untergrenze angeben, auf deren Basis die Alternativenmenge schrittweise reduziert wird. Alternativ können dem Entscheidungsträger auch die Menge der Pareto-optimalen Ablaufpläne zur Auswahl gestellt werden (vgl. STOSIK 2005).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Auswahl der Zielfunktion zur Bewertung alternativer Produktionspläne stets verschiedene Aspekte zu berücksichtigen hat. Während zeitbezogene Kriterien auf einfach zu messenden Größen basieren, ermöglicht die monetäre Bewertung bei entsprechender Datengrundlage ein Abwägen von Maßnahmen bei gegensätzlichen Zielgrößen und somit das Finden der optimalen Lösung. Schwierig gestaltet sich zudem die

Differenzierung einzelner Aufträge in Bezug auf die Kunden (z. B. höhere Strafzahlungen oder andere Gründe für besondere Prioritäten) wenn ausschließlich Kriterien wie Termintreue oder Durchlaufzeit herangezogen werden, die zwar eindeutig zu messen sind, darüber hinaus aber keine weiteren Randbedingungen berücksichtigen können.

Im Bereich der multikriteriellen Bewertung existieren zudem verschiedene Methoden zur Verrechnung von Kriterien unterschiedlicher Dimension. Während sich die a-priori-Methoden meist mit geringem Aufwand lösen lassen und auch ohne Einbeziehung des Entscheidungsträgers auskommen, sind a-posteriori-Methoden durch den Prozess der Einschränkung des pareto-optimalen Lösungsraums sehr zeitaufwändig und somit nur bedingt für die echtzeitnahe Werkstattfertigung geeignet. Dahingegen erfordern die a priori-Methoden, insbesondere die lexikografische Ordnung, meist ein dominantes Zielkriterium.

### 2.3.3 Ansätze zur Verbesserung der Datenerfassung

Zur gezielten Steuerung der Produktion ist jede Steuerungsentscheidung in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Situation und dessen Kontext zu treffen. Aus diesem Grund ist die Beschaffung und Verarbeitung der steuerungsrelevanten Informationen Teil des Prozesses zur Entscheidungsfindung (vgl. LUDWIG 2001, S. 38). Das Schlüsselproblem zur Realisierung einer adaptiven Produktionssteuerung ist dabei die Verfügbarkeit von Informationen über die Situation und den Fortschritt in der Fertigung in Echtzeit (vgl. SZELKE & MONOSTORI 1999; ZHOU ET AL. 2008).

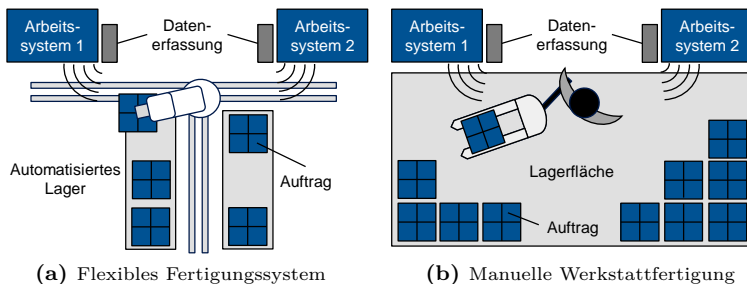
In der praktischen Anwendung wird dies über BDE-Terminals gelöst (vgl. Abschnitt 1.2.4). Diese ermöglichen eine Verkürzung des Rückmeldeprozesses, eine Verzögerung bleibt jedoch erhalten. Potenzial wird dabei vor allem der RFID-Technologie zugeschrieben, da im Gegensatz zu Barcodes oder anderen Erfassungstechnologien keine Prozessabläufe für den Erfassungsvorgang geändert werden müssen (DENGLER 2014, S. 49). Praktische Umsetzungen von adaptiven Steuerungsansätzen, die in hohem Maße von Echtzeitdaten abhängig sind, nutzen FFS in Kombination mit RFID-basierter Datenerfassung an diskreten Punkten (vgl. u. a. HIGUERA & MONTALVO 2007; DRIESSEL 2011; OSTGATHE 2012). Der Übertragung auf die manuelle Werkstattfertigung steht dabei der im Folgenden dargestellte Sachverhalt (s. Abb. 2.9) entgegen. In FFS wird der Auftrag stets nach einem vorgegebenem Prozess erfasst (z. B. bei Eingang an einem Fertigungssystem). Aufgrund des automatisierten Materialtransportes ist jede Bewegung des Auftrags zwischen den RFID-Erfassungspunkten über die Verfahrewege der Fördermittel nachvollziehbar, sodass stets Transparenz über den Prozess besteht. In der manuellen Werkstattfertigung ist aufgrund des manuellen Transports dagegen nicht nachvollziehbar, wo und in welchem Zustand sich der Auftrag vor oder nach der Erfassung befindet (vgl. ARPING

1977, S. 46). Das in einer manuellen Werkstattfertigung nicht von einer ständigen Kenntnis des Auftragsortes ausgegangen werden kann, wird durch die eigene Studie (s. Anhang A) bestätigt.

Aus diesem Grund ist die Wahl der Erfassungspunkte entscheidend für die zugrundeliegende Datenqualität. DENGLER (2014, S. 49) empfiehlt, die Zu- und Abgänge der Werkstätten bzw. Arbeitsplätze als Erfassungsorte, womit Transparenz über die zur Bearbeitung bereitstehenden Aufträge besteht, die zeitliche Lage der eigentlichen Bearbeitung innerhalb der Werkstatt aber unklar bleibt. ENGELHARDT (2015) betrachtet ebenfalls die Zu- und Abgänge und modularisiert die Fertigung nach steuerungsorientierten Gesichtspunkten durch Zusammenfassung von Arbeitssystemen, die zusammenhängende Arbeitsvorgänge durchführen. Das zugrundeliegende Steuerungsprinzip ist den vollständig-reaktiven Strategien zuzuordnen. Da diesem Steuerungsprinzip kein terminierter Produktionsplan zugrunde liegt, besteht auch keine Abhängigkeit von der Kenntnis über die exakten Bearbeitungsstart- und Endzeiten. CAO ET AL. (2013) erhöhen die Granularität durch zusätzliche Erfassungspunkte bei Bearbeitungsstart und -ende sowie an Transportmitteln wie Gabelstaplern.

Weitere Ansätze zur Erhöhung der Datenqualität leiten aus bestehenden Rückmeldedaten anhand von kausalen Zusammenhängen zusätzliche Informationen ab (vgl. TÖNSHOFF & SIELMANN 1997; RIPP 2011). Unterstützend wird dabei ein Simulationsmodell genutzt, das auf Basis der Ist-Daten sowie Kausalzusammenhängen ein vollständiges, digitales Abbild der Fertigung erzeugt.

Unter dem Begriff High Resolution Production Management (HRPM) beschreiben SCHUH ET AL. (2007) die Erhebung einer Vielzahl von Echtzeitdaten aus der Produktion über ein Sensornetzwerk und deren anschließende Auswertung bzw. Nutzung. Die steigende Durchdringung der Produktion mit intelligenten Objekten, sog. Cyber-Physical Systems (CPS, vgl. GEISBERGER & BROY 2012,



**Abb. 2.9:** Diskrete Datenerfassung durch RFID bei automatisierten und manuellen Materialtransport

S. 244), ermöglicht eine große Datenbasis, um die Aussagequalität der Produktionssteuerung zu erhöhen (SCHUH ET AL. 2013). Das darauf aufsetzende Cyber-Physical Production Management (SCHUH ET AL. 2013; HAUPTVOGEL 2015) nutzt die Datenbasis, um Abweichungen vom geplanten und realen Verlauf zu bestimmen und durch zielgerichtete Maßnahmen entweder die Feinplanung oder die reale Produktion anzupassen.

Über die diskrete Datenerfassung hinaus ermöglichen Technologien der Echtzeitortung eine kontinuierliche Erfassung der Position von Objekten im Raum (vgl. DEAK ET AL. 2012; PIGGIN & BRANDT 2006). Im Kontext der Produktionssteuerung nutzen THIESSE & FLEISCH (2008) die Ortungstechnologie, um die Transparenz über die zu bearbeitenden Aufträge an einer Arbeitsstation zu erhöhen und die Entfernung als Kriterium in die Auftragsauswahl einzubeziehen. Das ortungsgestützte Produktionsleitsystem von WERTHMANN ET AL. (2012) wurde für den Nacharbeitsprozess bei Automobilherstellern entwickelt. Über eine Ortung der Fahrzeuge wird die jeweilige Auslastung der Nacharbeitsbereiche ermittelt und der Werker so zu den Bereichen mit der geringsten Wartezeit geleitet. Gleichzeitig dient die Ortung der Dokumentation der Fahrzeugstandorte und unterstützt den Werker bei der Fahrzeugsuche. Das fertigungsnahe Kontextinformationssystem von LUCKE (2014) nutzt ein Produktionsumgebungsmodell, das unter anderem mit ortungsbasierten Daten angereichert wird, um aus dem Kontext eine Informationsbasis abzuleiten, die ad-hoc angefordert werden kann (z. B. zur effizienten Koordination von Instandhaltungsmitarbeitern). Im Forschungsprojekt *LOSI - Layout-based Order Steering* der Hochschule Landshut werden Aufträge in einer Fließfertigung über ein Echtzeitortungssystem erfasst und der Auftragsfortschritt visualisiert (SCHNEIDER & Ettl 2012). Dabei wird die Fertigung in Bereiche strukturiert und jeweils der Ein- und Austritt in und aus diesen Bereichen als Beginn und Ende dieses Bearbeitungsschrittes gemessen. Die Funktionsweise und Potenziale sind durch KLEIN (2011) beschrieben.

Eine weitergehende Nutzung der georteten Koordinaten zur Datenerfassung in der Werkstattfertigung wurde bisher nicht beschrieben. Dagegen befassen sich Ansätze aus der Bauindustrie mit der Ableitung von Zustandsinformationen aus Ortungsdaten zur steuernden Nutzung. So leiten LU ET AL. (2007) aus der georteten Position von Baufahrzeugen den aktuellen Betriebsstatus ab und lösen Ereignismeldungen, wie z. B. das Eintreffen an einer Baustelle, aus, um die Fahrzeuge auch in hochverdichteten, urbanen Gebieten verfolgen zu können. RAZAVI & MOSELHI (2012) sowie TESORIERO ET AL. (2010) nutzen das Prinzip der Ortung, um Personen und Objekte innerhalb eines Gebäudes zu lokalisieren und navigieren. Eine Besonderheit beider Ansätze ist, dass der Raum mit RFID-Transpondern markiert wird und die zu ortenden Personen oder Objekte ein RFID-Lesegerät mit sich führen. HÖRL (2012a, b) nutzt die Objektortung für die Kollisionswarnung von Kränen und Baufahrzeugen, indem diese Objekte

mit einem Annäherungs- sowie einem Kollisionsbereich versehen werden. Bei Überschneidungen werden entsprechende Warnungen ausgegeben. Ebenfalls im Sicherheitsbereich ist der Ansatz von TEIZER ET AL. (2013) zu verorten, bei dem Werker in einer Trainingsumgebung lokalisiert werden und aus Position und Geschwindigkeit abgeleitet wird, ob sie warten, arbeiten oder den Ort wechseln. Zur Unterscheidung von Warte- und Arbeitszeiten werden zusätzlich die Bewegungen des Arbeitsmittels erfasst und über bewegte Gefahrenzonen Gefahrensituationen erkannt.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die diskrete RFID-basierte Datenerfassung nur in Kombination mit weiteren Daten sowie entsprechender Berücksichtigung kausaler Zusammenhänge zur Schaffung einer ausreichenden Datenbasis für die echtzeitnahe Werkstattfertigung geeignet ist. Dies bedingt einen hohen Investitionsbedarf in Sensortechnologien sowie die Kenntnis über die Datenzusammenhänge. Ein großes Potenzial bietet dagegen die Technologie der Echtzeitortung für die Ableitung des Auftragsstatus. Erste Ansätze in der Produktionssteuerung beschränken sich noch auf die Messung eindeutig messbarer Informationen. Anwendungsbeispiele aus der Bauindustrie zeigen, dass durch die Ergänzung von Kontextinformationen eine Ableitung von Zustandsinformationen möglich ist.

### 2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

Die Vielzahl an Arbeiten zu den in Abschnitt 1.3 aufgezeigten Aspekten der Problemstellung bieten eine gute Basis für die Entwicklung eines Systems zur fertigungsbegleitenden Werkstattsteuerung, um adaptiv und ganzheitlich auf Störungen zu reagieren, wenngleich in nachfolgend aufgeführten Bereichen Handlungsbedarf besteht.

Wie die Analyse der Steuerungsverfahren (Abschnitt 2.1) zeigt, verringert sich bei steigender Heterogenität der Materialflüsse und Arbeitspläne die Eignung vollständig-reaktiver Steuerungskonzepte. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Komplexität die Bedeutung eines zentralen Überblicks über Auftragsfortschritt, Verzögerungen und vorhersehbare Fertigstellungszeiten, was vollständig-reaktive Konzepte ebenfalls nicht leisten können. Aus diesem Grund sind bei der Werkstattfertigung hochindividueller Produkte prädiktiv-reaktive Steuerungskonzepte zu bevorzugen. Handlungsbedarf besteht hier in der Ableitung einer geeigneten Steuerungsarchitektur, die eine kurzfristige, automatische Reaktion auf Störungen bei Abwägung einer möglichst guten Lösung einerseits und einer Vermeidung von Planungsnervosität andererseits ermöglicht.

Eine weitgehende Durchsuchung des Lösungsraums wird durch die Neuberechnung der Auftragsreihenfolge mit Optimierungsalgorithmen des JSSP erreicht, wobei insbesondere den iterativen Heuristiken eine hohe Bedeutung zukommt

(s. Abschnitt 2.2). Die Herausforderung der optimalen Lösung des JSSP führte zu einer Vielzahl von Lösungsalgorithmen. Auffällig ist, dass diese Arbeiten vor allem aus dem Bereich des Operations Research und der Informatik stammen und sich weitgehend auf die theoretische Problemlösung beschränken. Die praktische Anwendung im Kontext der PPS wird dabei nur rudimentär betrachtet. Auch große JSSP lassen sich mit einer Vielzahl von Optimierungsverfahren in kurzer Zeit optimal oder nahezu optimal lösen. Das höchste Potenzial bieten dabei Metaheuristiken der Nachbarschaftssuche, vor allem Genetische Algorithmen. Deren konkrete Ausgestaltung ist dabei sehr wichtig, da die Integration von Randbedingungen der realen Fertigung den Rechenaufwand erhöht. In Abhängigkeit der Steuerungsarchitektur besteht daher Handlungsbedarf in der Entwicklung eines Planungsalgorithmus, der in sehr kurzer Zeit realistische JSSP mit allen bestehenden Randbedingungen bestmöglich löst. Eine große Herausforderung liegt dabei in der Gestaltung der Nachbarschaft und zugehörigen Algorithmen zur Lösungssuche.

Das Störungsmanagement (Abschnitt 2.3.1) bietet mit der störungsabhängigen Einleitung von Maßnahmen das Potenzial, außerhalb einer Produktionsneuplanung zielgerichtete Anpassungen im kleinen Umfang vorzunehmen. Handlungsbedarf besteht noch in der Entwicklung von Störklassen, die zum einen alle in der Realität möglichen Störungen mit Auswirkung auf den Produktionsverlauf umfassen und zum anderen eine zielgerichtete Ableitung von Maßnahmen ermöglichen. Darauf aufbauend sind Maßnahmen oder Maßnahmenfolgen zu entwickeln, die entsprechend der Störungskategorie angestoßen werden.

Zuletzt erfordert jede Maßnahme bzw. Neuplanung die Bewertung des Erfolgs (Abschnitt 2.3.2). Eine Herausforderung liegt dabei in der Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen bzw. in der Abwägung von Maßnahmen mit gegenteiliger Wirkung. Großes Potenzial verspricht die Betrachtung monetärer Zielgrößen, mit denen die Auswirkungen quantifiziert und in einer Kostenfunktion miteinander verrechnet werden können. Aufgrund der Uneinigkeit in der Literatur bezüglich der Kostenbestandteile sowie der schwierigen Quantifizierung der Kostensätze besteht Handlungsbedarf in der kontextbezogenen Definition von bewertungsrelevanten Kostenfaktoren sowie eine Diskussion der Möglichkeiten zur Berechnung dieser Faktoren.

In Bezug auf die echtzeitnahe Erfassung von Betriebsdaten bietet die Nutzung von Ortungsdaten großes Potenzial, um die Abbildung des Ist-Zustands der Produktion im Steuerungssystem zu ermöglichen. Zur Realisierung ist hier die Entwicklung einer Methode, mit der anhand von Ortsänderungen zuverlässige Aussagen über Änderungen im Auftragsstatus zu treffen sind, erforderlich.

Auf Basis des Handlungsbedarfs sowie der Zielsetzung dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel die Anforderungen an die Lösung aufgestellt und zudem Annahmen zur weiteren Spezifizierung des Betrachtungsraums definiert.

## 3 Rahmenbedingungen für das System zur Werkstattsteuerung

Wie in Abschnitt 1.4.1 beschrieben, ist das Ziel dieser Arbeit die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit in der Werkstattfertigung mit Schwerpunkt auf der Termintreue und der Prognostizierbarkeit des Fertigungsverlaufs. Aufbauend auf der Zielsetzung sowie den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.4 werden zunächst allgemeine Anforderungen für die Entwicklung des Steuerungssystems aufgestellt (Abschnitt 3.1) und Annahmen zur zugrundeliegenden Produktion sowie des Umfeldes getroffen (Abschnitt 3.2).

### 3.1 Anforderungen

Aus der übergeordneten Zielsetzung sowie den geforderten Eigenschaften ergeben sich folgende Anforderungen (AF):

- AF 1: *Berücksichtigung der Termintreue*: Das Ziel der Erhöhung der Termintreue (vgl. Abschnitt 1.4.1) erfordert die Berücksichtigung dieser Größe im Zielsystem.
- AF 2: *Bewertung von Aufwand und Nutzen*: Das übergeordnete Ziel der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit erfordert die Abwägung von Aufwand und Nutzen einer Steuerungsentscheidung, um die bestmögliche Lösung zu finden (vgl. NIETSCH ET AL. 1991; WELLER 2002, S. 35).
- AF 3: *Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufes*: Eine stetige Auskunftsbereitschaft über den weiteren Produktionsverlauf erfordert die schnelle Einbeziehung aktueller Ereignisse und die Abschätzung der daraus resultierenden Auswirkungen auf den Produktionsplan.
- AF 4: *Globale Betrachtungsweise*: Jede Steuerungsentscheidung ist unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf andere Bereiche/Werkstätten sowie den weiteren Produktionsverlauf zu treffen.
- AF 5: *Kurze Reaktionszeiten*: Steuerungsentscheidungen sind ohne große Verzögerung nach dem Eintreten des Störereignisses zu treffen. Dies erfordert

- zum einen ein Antwortzeitverhalten<sup>39</sup> von wenigen Minuten, da das Ergebnis nach Verstreichen eines Entscheidungszeitraums nicht mehr von Nutzen ist (vgl. SCHULTE 1995, S. 28; NIETSCH ET AL. 1991), zum anderen eine permanente Erfassung des Fertigungsverlaufs sowie der Störereignisse. Aufgrund der Dringlichkeit der Entscheidung muss diese in Echtzeit ablaufen (vgl. NIETSCH ET AL. 1991; WELLER 2002, S. 36).
- AF 6: *Vollständigkeit des Prozessmodells*: Das zugrundeliegende Prozessmodell muss alle relevanten Aspekte realitätsnah und anwendungsgerecht abbilden und auf ein konsistentes Zielsystem hinführen (vgl. WIENDAHL ET AL. 1993a sowie CORSTEN & GÖSSINGER 2012, S. 581). Da sämtliche zu entwickelnden Steuerungsalgorithmen auf dem Prozessmodell basieren, steigt die Effizienz des Steuerungssystems, je genauer das Modell die Realität abbildet (vgl. auch WELLER 2002, S. 35).
- AF 7: *Vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes*: Um aus der Vielzahl an Steuerungsalternativen gute Lösungen zu erschließen, ist der zu durchsuchende Lösungsraum nicht verfahrensbedingt einzuschränken.
- AF 8: *Abwägung zwischen geringer Planungsneurose und guter Zielwertverwirklichung*: Die Reihenfolgevertauschungen sind gering zu halten (vgl. LÖDDING 2008, S. 79), um die Planungsneurose nicht unnötig zu erhöhen. Gleichzeitig ist die Reihenfolgeänderung als Instrument vorzusehen, um generell eine Zielwertverbesserung zu ermöglichen.

## 3.2 Annahmen

Im Folgenden werden auf Basis der Spezifizierung in Abschnitt 1.4.2 einige Annahmen (AN) getroffen, um die Rahmenbedingungen des zu entwickelnden Systems aufzustellen und so ein zielgerichtetes Vorgehen zu ermöglichen. Im Folgenden werden zunächst einige Annahmen hinsichtlich der umgebenden Systemwelt aufgestellt, die sich an der aktuellen Entwicklung in der Praxis (vgl. Abschnitt 1.2.3) mit Schwerpunkt auf KMU orientiert:

- AN 1: *Produktionsbegleitendes Steuerungssystem*: Aufgrund des Vorhandenseins leistungsfähiger Systeme zur Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 1.2.3) umfasst das Einsatzgebiet der zu entwickelnden Lösung ausschließlich den produktionsbegleitenden Zeitraum zwischen zwei Planungsläufen. Der Produktionsplan für diesen Zeitraum wird mittels einem übergeordneten Planungssystem erstellt, das eine Vielzahl von Restriktionen

---

<sup>39</sup> Das Antwortzeitverhalten gibt Auskunft über die Geschwindigkeit, in der ein Optimierungsergebnis erzielt wird (vgl. SCHULTE 1995, S. 28).



der Feinplanung wie z. B. Materialverfügbarkeit berücksichtigt und ausschließlich freigegebene Produktionsaufträge an das Steuerungssystem übergibt (vgl. WEULE & SCHMITT 1989). Der Zeitraum zwischen zwei Planungsläufen wird im Folgenden auch als Steuerungsperiode bezeichnet.

AN 2: *Definiertes Produktionsprogramm*: Das Produktionsprogramm der Steuerungsperiode ist bekannt und vollständig, d. h. in der Regel werden keine neuen Aufträge während einer Periode eingesteuert. Weiterhin sind die zugehörigen Stammdaten (z. B. Maschinenfolge, Plan-Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten) vollständig und aktuell (vgl. auch PAULIK 1984, S. 19ff.; VDI-RICHTLINIE 5600-1 2007). Aufgrund existierender Ermittlungsmethoden (vgl. z. B. SACKERMANN & DEUSE 2010) kann davon ausgegangen werden, dass die Plan-Werte für Bearbeitungs- und Rüstzeiten realitätsnah sind. Im vorgelagerten Planungssystem wird eine eindeutige Maschinenfolge und Losgröße festgelegt, existierende Alternativen sind in den Stammdaten abgespeichert und können bei Bedarf abgerufen werden. Bei wachsenden Stücklisten (vgl. HOFFMANN 2012) ist anzunehmen, dass die vorzunehmenden Arbeitsschritte bei Produktionsstart ausreichend definiert sind.

Darüber hinaus werden im Folgenden einige Annahmen bezüglich der zugrundeliegenden Werkstattfertigung getroffen, die über die in Abschnitt 1.4.2 getroffenen allgemeinen Eigenschaften hinausgehen und somit auch eine Abgrenzung gegenüber Sonderfällen erfolgt. Diese Annahmen dienen als Basis zur zielgerichteten Entwicklung des Steuerungssystems. Eine Berücksichtigung der im Folgenden ausgegrenzten Aspekte sollte jedoch unter Akzeptanz von Umständen, in Form zusätzlicher Algorithmen oder Rechenoperationen, möglich sein.

AN 3: *Gerichtete Technologiefolge*: Die Maschinenfolgen der meisten Aufträge weisen aus technologischen Gründen (z. B. Zerspanung erfolgt vor Beschichtung) keine gegenläufige Abfolge auf, so dass die Fertigungstechnologien eine gerichtete Folge aufweisen. Der Fall, dass z. B. ein Auftrag die Maschinenfolge  $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3$  aufweist, ein anderer die Folge  $M_3 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1$ , ist als unrealistisch anzunehmen (vgl. TEICH 1998, S. 250). Dies steht in keinem Widerspruch zu ungerichteten Materialflüssen, da sich diese aus individuellen Maschinenfolgen (Auslassen von Technologien) sowie Rückflüssen, d. h. der wiederholten Bearbeitung an einer Maschine, ergeben (vgl. auch KRÄMER 1968, S. 124f.).

AN 4: *Lineare Maschinenfolge*: Jeder Arbeitsvorgang eines Auftrags besitzt höchstens einen Vorgänger sowie einen Nachfolger (vgl. auch PAULIK 1984, S. 19ff.). Nichtlineare Maschinenfolgen gelten als Sonderfälle, deren Fertigung mit dem zu entwickelnden System zwar möglich sein muss,

eine Optimierung des Systems auf nichtlineare Maschinenfolgen jedoch nicht erforderlich ist.

- AN 5: *Begrenzte Maschinenkapazität, unbegrenzte Personal und Lagerkapazität:* Jede Maschine kann gleichzeitig nur einen Auftrag bearbeiten (vgl. auch PAULIK 1984, S. 19ff.). Dagegen werden Restriktionen hinsichtlich Personal und Lagerflächen nicht berücksichtigt, da auf Basis der vorgelagerten Planung davon ausgegangen werden kann, dass jede beplante Maschine auch bedient wird und die Anzahl der sich gleichzeitig in der Produktion befindlichen Aufträge bereits in der Planung auf ein Maß beschränkt wird, dass die vorhandenen Flächen für die Lagerung ausreichen.
- AN 6: *Ausschluss intensitätsmäßiger Anpassung:* Die Bearbeitungszeiten der Aufträge sind fix und können in der Regel nicht beschleunigt werden (vgl. auch PAULIK 1984, S. 19ff.).
- AN 7: *Wenige Rückflüsse im Materialfluss:* In der Regel durchläuft ein Auftrag jede Maschine bzw. jedes Arbeitssystem nur einmal. Rückflüsse existieren, sind jedoch bei der Gestaltung des Steuerungssystems zu vernachlässigen, sofern dessen Ausführung Rückflüsse im Auftragsdurchlauf nicht ausschließt.

## 4 Systemübersicht

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über das zu entwickelnde System zur adaptiven Werkstattsteuerung. Zunächst wird der gewählte Ansatz der fertigungsbegleitenden Reihenfolgebildung vorgestellt (Abschnitt 4.1). Im Anschluss erfolgen die Beschreibung des Systems im Sinne der Produktionsregelung (Abschnitt 4.2) sowie eine Übersicht über die Systemelemente. In Abschnitt 4.3 werden die Elemente der Zielfunktion diskutiert und das Kapitel mit einer Definition des zugehörigen Datenmodells abgeschlossen (Abschnitt 4.4).

### 4.1 Ansatz der fertigungsbegleitenden Reihenfolgebildung

#### 4.1.1 Grundprinzip

Der Stellhebel der adaptiven Werkstattsteuerung beschränkt sich auf die Reihenfolgebildung, da gemäß der Annahme AN2 eines definierten Produktionsprogramms die Auftragserzeugung und Auftragsfreigabe vor Beginn des Steuerungszeitraums erfolgen und die Kapazitätssteuerung im kurzfristigen Steuerungsbereich nur eingeschränkt möglich ist. Weiterhin erfordert die Steuerung einer Werkstattfertigung mit ausgeprägt heterogenen Materialflüssen und Bearbeitungszeiten den Einsatz einer prädiktiv-reaktiven Produktionssteuerung, da nur anhand des zentralen Produktionsplans alle Auswirkungen einer Steuerungsentscheidung auf den späteren Produktionsverlauf berücksichtigt werden können (vgl. Abschnitt 2.4). Um eine Abgrenzung zum Ergebnis der Produktionsplanung zu schaffen, wird der dem Steuerungssystem zugrundeliegende terminierte Plan im Folgenden als Ablaufplan bezeichnet.

Da die dezentrale Abstimmung der Produktionsdurchlaufs nicht oder nur unter sehr großem Kommunikationsaufwand möglich ist, orientiert sich das zu entwickelnde Steuerungssystem an dem von WARNECKE (1989) geprägten Grundsatz „*zentral planen und steuern – dezentral fertigen.*“ Die Mitarbeiter in den Werkstätten konzentrieren sich auf die Ausführung der einzelnen Teilverrichtungen eines Fertigungsschrittes sowie auf die schnelle Behebung von physischen Störungen (z. B. Maschinenausfälle, Produktionsfehler u.a.), während die werkstattübergreifende Koordination zentral durch das hier beschriebene Steuerungssystem vorgenommen wird.

Mit einer hierarchischen Steuerungsarchitektur ist eine bereichsübergreifende Koordination möglich. Deren Struktur basiert aber auf der Grundannahme,

dass auf den untergeordneten Hierarchieebenen Arbeitsvorgänge innerhalb vorgegebener Grenzen frei koordiniert werden können und erst bei Grenzverletzungen (z. B. Übergabeterminen an die nachgelagerte Produktionssteuerung) eine Abstimmung mit anderen Bereichen notwendig ist. Bei hochvarianten Produkten ist dies nur mit Übergangspufferbeständen möglich, die wiederum einer wirtschaftlichen Fertigung im Wege stehen. Somit sind alle Werkstätten und Produktionsbereiche, zwischen denen fertigungsfolgebedingte Materialflussbeziehungen bestehen, zusammen in einem zentralen Modell zu koordinieren. Eine Hierarchie besteht hingegen zwischen dem Planungssystem und dem Steuerungssystem, wobei das Steuerungssystem aufgrund des geringeren Aufgaben- und Kompetenzbereichs dem Planungssystem untergeordnet ist.

Das Grundprinzip der adaptiven Werkstattsteuerung sieht somit die Reaktion auf Planabweichungen durch Anpassungen in der Auftragsreihenfolge zur Optimierung einer Zielfunktion in Bezug auf den gesamten Fertigungsbereich vor. Das zugrundeliegende Problem entspricht daher einem praktischen JSSP.

Während der Produktionsplan periodisch aktualisiert wird und dabei auch neue Arbeitsvorgänge eingeplant werden, dient die Steuerung der Überwachung und Sicherung des geplanten Produktionsverlaufs zwischen den Planungsperioden. Das Ergreifen von Steuerungsmaßnahmen erfolgt somit ereignisorientiert.

### 4.1.2 Reduktion der Modellkomplexität

Um der Anforderung nach kurzen Reaktionszeiten nachzukommen, ist die Rechenzeit des Verfahrens zur Lösungssuche möglichst kurz zu halten. Im JSSP (vgl. Abschnitt 2.2.1.1) sind kurze Rechenzeiten durch die Verringerung folgender Einflussfaktoren zu erreichen:

- *Dimension des Problems*: Anzahl zu betrachtender Maschinen und Aufträge.
- *Komplexität des Problems*: Anzahl der zu treffenden Entscheidungen (z. B. Maschinenauswahl, Alternatarbeitsgänge etc.).

Die Obergrenze der Problemdimension wird durch die Menge der feststehenden Aufträge mit den dazugehörigen Arbeitsvorgängen und Maschinen bestimmt, während die Untergrenze durch das geplante Produktionsprogramm der Steuerungsperiode sowie die beplanten Maschinen bestimmt wird. Je weiter ein Auftrag in der Zukunft eingeplant ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass dieser in die Steuerungsperiode vorgezogen werden kann. Gründe sind neben der Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien bzw. Vorprodukte auch die Verbindlichkeit des Arbeitsvorgangs (vgl. Abschnitt 1.2.1).

Darüber hinaus ist die Beplanung der Kapazitäten mit steigendem Zeitverlauf zunehmend unvollständig, da anzunehmen ist, dass Leerzeiten mit neuen Aufträgen aufgefüllt werden. Eine Betrachtung aller fest eingeplanten Aufträge, wie es in der Regel bei Planungsläufen erfolgt, ist daher im Steuerungskontext nicht zielführend. Um zu vermeiden, dass im Laufe der Steuerungsperiode die Anzahl der theoretisch möglichen Reihenfolgealternativen stetig abnimmt, wird als Problemdimension ein Ausschnitt aus dem gesamten Produktionsplan gewählt, der die Steuerungsperiode sowie mindestens eine Folgeperiode umfasst (s. Abb. 4.1). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass zum einen ausreichend viele Handlungsoptionen zu jedem Zeitpunkt im Steuerungszeitfenster zur Verfügung stehen, zum anderen das System nicht durch Aufträge, die aus Sicht der Planung nicht zur Produktion vorgesehen sind, verlangsamt wird. Dabei werden Arbeitsvorgänge, die tagesübergreifend eingeplant sind, vollständig in den Arbeitsinhalt der Produktionssteuerung übernommen. Aufträge, deren Bearbeitung bereits begonnen hat, stehen nicht zur Steuerung zur Verfügung, die zugehörige Maschine ist daher erst zum geplanten Fertigstellungszeitpunkt wieder verfügbar.

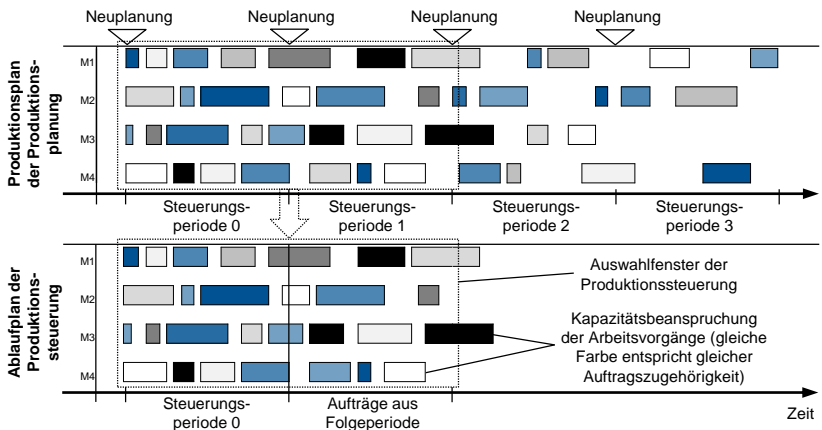
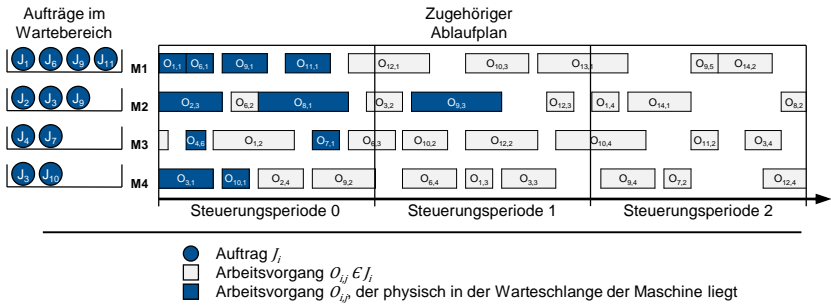


Abb. 4.1: Ausschnitt des Produktionsplans für die Dimension des Steuerungsinhalts

Die Reduzierung des Betrachtungsfensters auf das Auftragspektrum, das im Produktionsplan für die folgenden zwei Perioden eingeplant ist, beschränkt die Alternativenauswahl für die Reihenfolgebildung auf die zeitnah zur Produktion vorgesehenen Aufträge. Im Gegensatz zur Reihenfolgebildung durch Prioritätsregeln, deren Auswahlalternativen die Menge an Aufträgen im Wartebereich einer Werkstatt umfasst, können somit auch Aufträge berücksichtigt werden, die sich zum Steuerungszeitpunkt noch vor anderen Maschinen für vorgelagerte Arbeitsvorgänge befinden. Dagegen werden Aufträge, die sich aus

verschiedenen Gründen (z. B. Rüstzeitreduzierung) im Wartebereich vor der Maschine befinden, obwohl sie erst in wesentlich späteren Perioden zur Weiterbearbeitung vorgesehen sind, nicht bei der Auswahl von Steuerungsalternativen berücksichtigt. Auf diese Weise wird vermieden, dass Fertigungskapazität mit nicht eingeplanten Aufträgen belegt wird. In Abb. 4.2 sind die jeweils zur Steuerung verfügbaren Aufträge aus dezentraler Sicht (Aufträge im Wartebereich) sowie aus zentraler Sicht (markierte Aufträge im Ablaufplan) gegenübergestellt. Während sich der Auswahlbereich auf Maschine  $M1$  noch weitestgehend deckt, sind auf den Maschinen  $M3$  und  $M4$  insbesondere im späteren Verlauf viele Aufträge aus dezentraler Sicht noch nicht vorhanden.



**Abb. 4.2:** Vergleich der steuerungsrelevanten Aufträge aus Sicht der des physischen Wartebereichs sowie des Produktionsplans

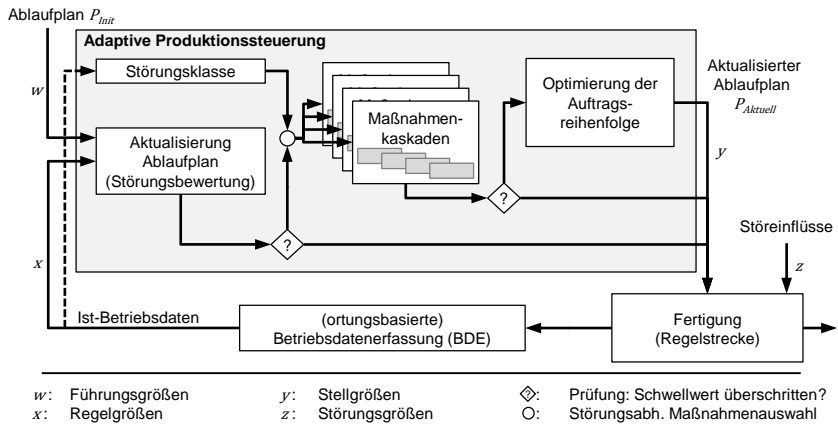
Die Untergrenze der Problemkomplexität ist durch das zugrundeliegende JSSP als einfache Reihenfolgebildung definiert. In der Praxis wird dagegen neben der Reihenfolgebildung auch auf alternative Maschinen sowie alternative Arbeitsgänge als Steuerungsinstrumentarium zurückgegriffen, da vor allem Engpässe nur bedingt durch reine Reihenfolgeänderungen behoben werden können. Die Erweiterung des JSSP um diese Auswahlentscheidungen (s. FJSSP in Abschnitt 2.2.1.1) führt zu einer starken Steigerung der Problemkomplexität. Da anzunehmen ist, dass im initialen Produktionsplan bereits die am besten geeignete Maschine bzw. Arbeitsfolge berücksichtigt wurde, sollte die Zuteilung des Initialplans weitgehend beibehalten werden. Ein Ausweichen auf Alternativen ist somit nur zulässig, wenn die zugrundeliegende Situation es erfordert (z. B. Kapazitätseinbußen durch längere Maschinenausfälle) und sind somit bedarfsweise separat vorzunehmen. Somit wird die Problemkomplexität auf die Auswahl der besten globalen Auftragsreihenfolge begrenzt.

Ein weiterer rechenintensiver Vorgang ist der Prozess des Scheduling (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Anstelle einer stochastischen Simulation des Fertigungsdurchlaufs (vgl. HEITMANN 1999, S. 137), wie sie u. a. ZETLMAYER (1994) und SIMON (1995) vornehmen, erfolgt das Scheduling durch eine deterministische

Berechnung der Start- und Endtermine unter Berücksichtigung von Rüst-, Übergangs- und Bearbeitungszeiten sowie durchschnittlicher Störungsdauer der Arbeitssysteme. Auf die stochastische Verteilung der Störungen in der Fertigung wird zugunsten der schnelleren Mittelwertbetrachtung verzichtet. Da zu erwarten ist, dass der errechnete Schedule aufgrund eben dieser stochastischen Störungen ohnehin im weiteren Verlauf wieder ungültig wird, kann das Ergebnis der deterministischen Berechnung als ausreichend gesehen werden. Voraussetzung ist eine hohe Aktualität der Plandaten, wie es bei kontinuierlicher Datenpflege angenommen werden kann.

### 4.2 Systemkomponenten und Aufbau des Reglers

Aus dem zuvor beschriebenen Ansatz der fertigungsbegleitenden Reihenfolgebildung ergibt sich das in Abb. 4.3 dargestellte System zur adaptiven Werkstattsteuerung. Die Systemkomponenten sind im Modell der Produktionsregelung mit Ausnahme der Betriebsdatenerfassung dem Regler zugeordnet.



**Abb. 4.3:** Einordnung des Systems zur adaptiven Werkstattsteuerung in das Modell der Produktionsregelung

Führungsgröße  $w$  des Systems ist der initiale Ablaufplan  $P_{Init}$  als Ergebnis der Produktionsplanung. Dieser enthält das terminierte Produktionsprogramm. Das im Folgenden detaillierter beschriebene Reglermodul verändert die Auftragsreihenfolge sowie ggf. die Maschinenzuordnung und gibt den aktuellen Ablaufplan  $P_{Aktuell}$  als Stellgröße  $y$  aus, der als Vorgabe für die Fertigung dient. Auf diese wirken die Störeinflüsse  $z$ , sodass über das Modul Betriebsdatenerfassung der Ist-Produktionsverlauf sowie ergänzende Angaben über Störungen als Regelgröße  $x$  erfasst und in den Regler zurückgespielt werden.

Da Reaktionen auf Änderungen gegenüber  $P_{Aktuell}$  zu treffen sind, werden die Daten in Form von Ereignissen erfasst, die mit entsprechenden Werten aus dem Ablaufplan verglichen werden können (vgl. auch PRITSCHOW & WIENDAHL 1995). Dies sind neben den Start- und Endzeitpunkten, deren automatisierte Erfassung durch Ableitung aus dem ortsungsbasiert erfassten Bewegungsverlauf in der manuellen Werkstattfertigung ermöglicht wird, auch Informationen zu Kapazitätsstörungen.

Die Algorithmen, mit denen die Auftragsreihenfolge an die aktuelle Produktionssituation adaptiert wird, sind im Reglermodul eingebettet. Da jedes Auflösen eines nicht mehr durchzusetzenden Plans für erneute Turbulenzen in der Produktion sorgt (vgl. WELLER 2002, S. 12), erfolgt die Reduzierung der Störungsauswirkungen zunächst durch ein Störungsmanagement in Form störungsklassenabhängiger Maßnahmenkaskaden, die anhand des Belegungsplans vollzogen werden können. Dessen Ziel ist die weitgehende Erhaltung der Gültigkeit des Ablaufplans sowie des Zielfunktionswertes. Als letzte Maßnahme ist für jede Störungsklasse eine Neubildung der Auftragsreihenfolge durch einen Optimierungsalgorithmus<sup>40</sup> (in Abb. 4.3 als separates Element dargestellt) vorgesehen. Sofern die vorgelagerten, regelbasierten Maßnahmen des Störungsmanagements ausreichen, die Auswirkungen der Störungen auszuregulieren, wird die Reihenfolgeoptimierung nicht mehr angestoßen. Zudem sind im Reglermodul die Alternativmaschinen bzw. -arbeitsfolgen (vgl. Abschnitt 4.1.1) hinterlegt. Eine Herausforderung im Störungsmanagement liegt in der richtigen Maßnahmenauswahl auf Basis der maschinell erfassbaren bzw. manuell durch den Werker oder Meister eingegebenen Daten, ohne die Störungsursachen im Detail zu kennen. Um eine ständige Initiierung der Regelung zu vermeiden, ist zudem ein Filter im Regler hinterlegt, der die Aktivierung von Steuerungsmaßnahmen bei kleinen Abweichungen im Minutenbereich durch einen Schwellwert vermeidet (vgl. auch WEINBRECHT 1993, S. 79).

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Ausgabe des Steuerungsergebnisses wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt, da insbesondere vor dem Hintergrund der Werkerakzeptanz weitere Forschungsarbeiten erforderlich sind, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Insbesondere die Detaillierung der Ursache-Wirkung-Verknüpfung von Störung und Aktion ist dabei von Bedeutung. Aufgrund der steigenden Durchdringung der Produktion mit Bildschirmen oder BDE-Terminals ist anzunehmen, dass die Ausgabe von Produktionsplänen bzw. daraus abgeleiteten Arbeitsanweisungen grundsätzlich realisierbar ist.

---

<sup>40</sup> Dieser ist als Heuristik ausgeführt, sodass das Ergebnis auch eine hinreichend gute Lösung an Stelle des Optimums sein kann. Da der Algorithmus innerhalb des erreichbaren Lösungsraums die beste Lösung sucht, wird dieser zur Abgrenzung gegenüber des maßnahmenbasierten Störungsmanagements in dieser Arbeit als Optimierungsalgorithmus bezeichnet.



## 4.3 Zielsystem

### 4.3.1 Zielgrößennormierung durch Kostenbetrachtung

Im Bereich der kurzfristigen Produktionssteuerung ist jede Steuerungsmaßnahme hinsichtlich des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses abzuwägen, was mit zeitlichen Zielgrößen allein nur schwer möglich ist (vgl. Abschnitt 2.3.2). Darüber hinaus existieren Fälle, in denen der finanzielle Aufwand nicht äquivalent zum zeitlichen Aufwand steigt (z. B. wenn ein Rüstvorgang mit zusätzlichen Aufwänden wie Werkzeugaufbereitung o. ä. verbunden ist). Somit wird die Bewertung auf der Grundlage von Kostengrößen vorgenommen.

Die Minimierung der ablaufabhängigen Kosten wirkt sich bei einem gegebenem Produktionsprogramm auf das Unternehmensziel der Gewinnmaximierung aus, da die Erlöse nicht von der Produktionssteuerung beeinflusst werden können<sup>41</sup> und somit allein die Höhe der Kosten einen Einfluss auf den Gewinn hat (vgl. auch SIEGEL 1973, S. 27). Ein weiterer Vorteil der Kostenbetrachtung ist deren Eindimensionalität, womit aufwändige Verrechnungen unterschiedlicher Zielgrößen vermieden werden können und eine eindeutige Lösung an Stelle einer pareto-optimalen Lösungsmenge zur Bewertung herangezogen werden kann.

Ein Großteil der in der Produktion entstehenden Kosten sind bereits durch übergeordnete Planungsinstanzen vorbestimmt (z. B. der Einzelkostenanteil, vgl. KIENZLE 2012, S. 12). Für die Bewertung der Steuerungsmaßnahmen ist es daher ausreichend, nur die Kostenbestandteile zu verrechnen, die sich zwischen verschiedenen Reihenfolgen unterscheiden. Somit lässt sich die Kostenfunktion auf den Umfang der reihenfolgeabhängigen Kosten reduzieren, die den durch die Parameter der Produktionssteuerung beeinflussten Kostenanteil repräsentieren (s. Tabelle 2.2 auf S. 58). Im folgenden Abschnitt erfolgt die Diskussion von Bestandskosten, terminbezogenen Kosten, Rüstkosten, Beschleunigungskosten, Transportkosten, Fertigungskosten und Nichtnutzungskosten bezüglich ihrer Berücksichtigung im zu entwickelnden Steuerungssystem sowie die Definition der zugehörigen Berechnungsvorschriften.

---

<sup>41</sup> Hier existieren Ausnahmen wie z. B. Erfüllungsprämien bei frühzeitiger Lieferung (vgl. NEIDHARDT 2007, S. 37), auf die die Produktionssteuerung Einfluss hat. Diese Zusatzerlöse können durch Wegfall bei Nichteintritt der Bedingung alternativ als Kosten modelliert werden.

### 4.3.2 Diskussion der reihenfolgeabhängigen Kostenbestandteile

#### 4.3.2.1 Bestandskosten

Eine Vielzahl von PPS-Ansätzen, die auf Basis von Kosten arbeiten, betrachten den Bestand in der Fertigung in Form von Kapitalbindungskosten (s. auch Tabelle 2.2 auf S. 58). Niedrige Bestände wirken sich nicht nur durch eine geringe Kapitalbindung, sondern gleichzeitig durch kurze Auftragsdurchlaufzeiten aus, da in der Regel Reihenfolgen bevorzugt werden, bei denen im Durchschnitt die Aufträge möglichst wenig Zeit in der Fertigung verbringen.

Die Kapitalbindung umfasst den Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt, in dem das Material für den Auftrag beschafft und bezahlt wurde und dem Zeitpunkt, in dem die Zahlung des Kunden für das Fertigungsprodukt erfolgt (vgl. APPELFELDER & BUCHHOLZ 2011, S. 177). Es ist anzunehmen, dass die Beschaffung und Bezahlung des Materials für alle Aufträge vor Beginn der Steuerungsperiode geschehen ist und die Zahlungszeitpunkte der Fertigprodukte bei eingehaltenem Liefertermin nicht vom Fertigungsablauf abhängen, sondern bei Auftragseingang mit dem Kunden vereinbart wurden (vgl. auch SIEGEL 1973, S. 30). Somit ist die reale Kapitalbindung nicht reihenfolgeabhängig.

Aus kalkulatorischer Sicht nimmt der Wert der Produkte im Fertigungsverlauf aufgrund der im Produktionsprozess vorgenommen Wertschöpfung immer stärker zu (vgl. DJABARIAN 2002, S. 11), jedoch hat eine frühere oder spätere Inanspruchnahme von Maschinen und Personal keine Verschiebung der damit verbundenen Auszahlungen zur Folge (SIEGEL 1973, S. 31). Eine frühe Fertigstellung werthaltiger Aufträge würde deren kalkulatorischen Wert ausschließlich von dem Verantwortungsbereich der Produktionssteuerung in den Folgebereich (anschließender Produktionsbereich, Lager, Versand) verschieben, ohne dass ein finanzieller Vorteil realisiert werden kann.

Neben Kapitalbindungskosten verursachen Bestände Lagerkosten. Da im betrachteten Zeitfenster die physischen Aufträge bzw. das dazugehörige Material in der Regel zu Beginn der Fertigung bereitgestellt werden und erst nach Fertigungsende in den Folgebereich übergehen, führen geringere Lagerkosten in der Produktion zu höheren Lagerkosten in Zwischen- und Endlagern aufgrund der Bestandsverschiebung.

Die Höhe der Bestände ist durch das Verhältnis von Auftragszugang zu Auftragsabgang determiniert. Der Auftragszugang ist durch das feste Produktionsprogramm fix, der Abgang durch die Liefertermine ebenfalls. Somit werden über die Reihenfolgesteuerung die Bestände zwar verwaltet, aber nicht in ihrer Höhe beeinflusst. Die Berücksichtigung von Beständen zur Realisierung kurzer Auftragsdurchlaufzeiten ist für die Produktionsplanung erforderlich (vgl. auch ARPING 1977, S. 91). Im Bereich der kurzfristigen Produktionssteuerung ist dagegen der kostenrelevante Stellhebel von Beständen aufgrund der meist

hohen Werkstattdurchlaufzeiten sehr gering. Aus diesen Gründen werden Bestände in Form von Kapitalbindungs- und Lagerkosten im Zeithorizont der Produktionssteuerung nicht berücksichtigt.

#### 4.3.2.2 Terminbezogene Kosten

Die Termintreue ist als wichtigstes Ziel der Werkstattfertigung (s. Abschnitt 1.2.2.1) in das Zielsystem aufzunehmen. Die Liefertreue ist von der Fertigungssteuerung durch die Termintreue des Abgangstermins beeinflussbar (vgl. LÖDDING 2008, S. 31), da nach Fertigstellung weitere Schritte (z. B. angeschlossene Montage oder Verpackung und Versand) bis zur endgültigen Auslieferung erfolgen können. Maßgebliche Messgröße ist dabei die Terminabweichung des Abgangstermins  $TAA$ , die in Anlehnung an DOMBROWSKI (1988, S. 49) und LÖDDING (2008, S. 29f.) als Differenz zwischen dem Ist-Bearbeitungsende  $TAE_{Ist}$  und dem Plan-Bearbeitungsende  $TAE_{Plan}$  bzw. Planabgangstermin  $TA_{Plan}$  berechnet wird:<sup>42</sup>

$$TAA = \begin{cases} TAE_{Ist} - TA_{Plan} & \text{falls } TA_{Plan} > TAE_{Ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.1)$$

LÖDDING (2008, S. 25f.) unterscheidet zudem zwischen der Termintreue und der Termineinhaltung. Letztere bezeichnet ausschließlich die positive Terminabweichung, die einer verspäteten Fertigstellung des Auftrags entspricht. Da das Zeitfenster der Produktionssteuerung nur ein geringes Vielfaches der Steuerungsperiode umfasst, sind die Konsequenzen einer verfrühten Fertigstellung zu vernachlässigen, sodass im Rahmen dieser Arbeit nur die Termineinhaltung betrachtet wird.

Die monetären Auswirkungen der Liefertermintreue ist durch die Verzugskosten beschrieben, die LÖDDING (2008, S. 37) als „Kosten, die einem Unternehmen aus der verspäteten Auslieferung eines Auftrags entstehen“, definiert (z. B. Konventionalstrafen oder erhöhte Lieferkosten aufgrund von Expresslieferungen). Auch der Wegfall von Erfüllungsprämien (z. B. für frühzeitige Lieferung) oder eine Abnahmeverweigerung des Kunden bei zu später Lieferung können zu erhöhten Kosten bei Terminverzug führen (vgl. NEIDHARDT 2007, S. 37). Opportunitätskosten, wie ein späterer Erlöseingang und der daraus resultierende Zinsverlust (vgl. SIEGEL 1973, S. 32) sind bei entsprechender Verfügbarkeit

<sup>42</sup> Der Planabgangstermin  $TA_{Plan}$  entspricht dem internen Liefertermin der Fertigung. LÖDDING (2008, S. 29f.) setzt diesen mit dem Plan-Bearbeitungsende  $TAE_{Plan}$  gleich, dies ist jedoch nur der Fall, wenn keine interne Pufferzeit (z. B. für Verpackung und Versand) vorhanden ist. Daher wird die Definition gegenüber LÖDDING abgewandelt.

ebenfalls zu berücksichtigen. Schwer zu messen sind hingegen langfristige Kosten einer schlechten Termineinhaltung, die sich durch den Vertrauensschaden und die damit verbundenen Verluste von Kunden ausdrücken (LÖDDING 2008, S. 37).

Die Verzugskosten  $K_V$  sind die Summe der Verzugskosten jedes Auftrags  $K_{V_i}$ , deren Verlauf auftragsspezifisch ausgeprägt ist. Dies ermöglicht im Gegensatz zur zeitbasierten Bewertung der Liefertreue die Differenzierung nach kundenspezifischen Ausprägungen, wie z. B. unterschiedlich hohe Konventionalstrafen. Die Verzugskosten fallen nur einmal pro Auftrag  $i$  an und sind von der Anzahl der durchlaufenden Arbeitsstationen  $M_k$  unabhängig.

$$K_V = \sum_{i=1}^n K_{V_i} \quad (4.2)$$

Da die Steuerungsperiode nur wenige Tage umfasst, ist zu erwarten, dass der Planabgangstermin einiger Aufträge außerhalb dieses Zeitraums liegt. Für die Steuerung ergeben sich nach o. g. Definition somit keine Verzugskosten. Ein Aufschieben dieser Arbeitsvorgänge führt zu Engpässen in nachfolgenden Perioden, wenn diese mit späteren Aufträgen konkurrieren, und somit zwangsläufig zu Verzugskosten. Um dies zu verhindern, müssen die Aufträge mit internen Fertigstellungsterminen für Teil-Fertigstellungen (z. B. die jeweils letzte Operation im Betrachtungszeitraum) sowie entsprechenden kalkulatorischen Verzugskosten<sup>43</sup> versehen werden. Bei Überschreitung dieser Termine fallen für das Unternehmen keine direkten Kosten an. Die kalkulatorischen Verzugskosten sind als Rückstellungen für Verspätungsrisiken zu interpretieren, die sich aus der Überschreitung der internen Fertigstellungstermine ergeben. Sie errechnen sich somit aus der Wahrscheinlichkeit des Lieferverzugs zum Zeitpunkt der Bewertung.

Werden alle Start- und Endzeitpunkte der Arbeitsvorgänge des zugrundeliegenden Ablaufplans eingehalten, so werden auch alle Planabgangstermine eingehalten. Daher wird angenommen, dass ein verspätungsfreier Abschluss des letzten betrachteten Arbeitsvorgangs einen fristgerechten Auftragsabschluss bedingt (Phase ① in Abb. 4.4).

Ein Überschreiten des geplanten Endzeitpunkts  $TV E_{i,L}$  des letzten Arbeitsvorgangs in der Steuerungsperiode bedingt die steigende Wahrscheinlichkeit eines Auftragsverzugs. Haupteinflussfaktor ist die Schlupfzeit  $t_{Schlupf}$ , die sich für jeden Auftrag  $i$  aus der Differenz der verbleibenden Zeit bis zur Fertigstellung

---

<sup>43</sup> Nach SCHWAB (2014, S. 94) sind kalkulatorische Kosten definiert als „*rein rechnerische, fiktive Kosten.*“

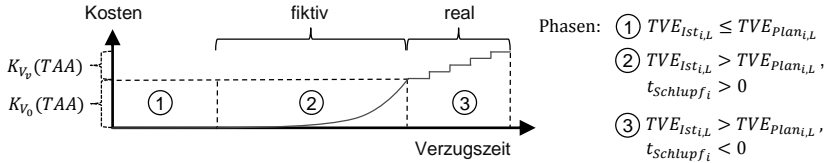


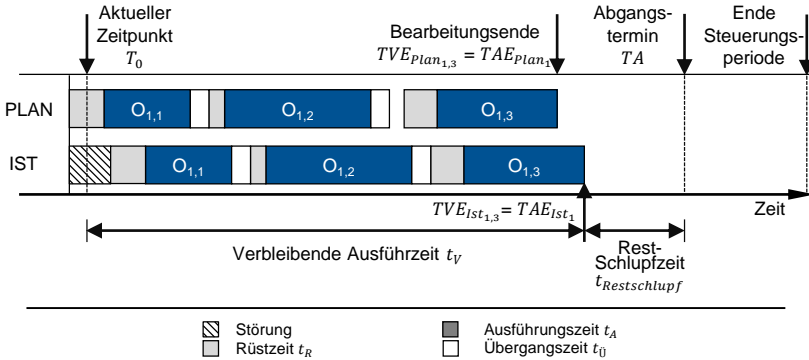
Abb. 4.4: Verzugskosten in Abhängigkeit der zeitlichen Lage

und der für die verbleibende Bearbeitung notwendige Zeit ergibt. In Anlehnung an LÖDDING (2008, S. 446) berechnet sich  $t_{Schlupf}$  als Differenz zwischen dem geplanten Abgangstermin des Auftrags  $TA_{Plan}$  und dem aktuellen Zeitpunkt  $T_0$  abzüglich der aller Rüst-, Auftrags- und Übergangszeiten der noch offenen Arbeitsvorgänge. Je geringer der Schlupfzeitanteil an der verbleibenden Ausführungszeit ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Auftrag in Verzug gerät (Phase ② in Abb. 4.4). Sobald die Schlupfzeit einen negativen Wert annimmt, ist der Planabgangstermin mit Sicherheit nicht mehr einzuhalten (Phase ③ in Abb. 4.4). Der Verlauf des Anstiegs der kalkulatorischen Verzugskosten ist stark abhängig von der Fähigkeit der Werkstatt und dessen Personal, Verspätungen außerhalb von Reihenfolgeänderungen aufzuholen. Je näher der Planabgangstermin rückt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, eine Verspätung aufzuholen. Daher wird ein exponentieller Verlauf dieser Funktion angenommen.

Die o. g. Definition von  $t_{Schlupf}$  nach LÖDDING (2008, S. 446) entstammt dem Anwendungsgebiet der Prioritätsregeln zur vollständig-reaktiven Produktionssteuerung, bei der keine geplanten Start- und Endzeitpunkte der Folgeaufträge existieren. Für die adaptive Produktionssteuerung auf Basis vollständig terminierter Produktionspläne ist die Belegung der Maschinen durch Folgeaufträge dagegen zu berücksichtigen, da diese den Handlungsspielraum zur Aufholung von Verspätungen vermindern. Neben der Rüstzeit  $t_{R_{i,j}}$ , der Ausführungszeit  $t_{A_{i,j}}$  und der Mindestübergangszeit  $t_{Ü_{i,j}}$  sind daher weitere Zeiten zu berücksichtigen, in denen der Auftrag infolge einer Maschinenbelegung warten muss. Aus diesem Grund wird die Summe der Einzelzeiten durch die verbleibende Durchführungszeit  $t_{V_i}$  ersetzt und die Restschlupfzeit  $t_{Restschlupf}$  als Differenz zwischen dem geplanten Abgangstermin  $TA_{Plan}$  und dem Plan-Endtermin  $TAE_{Plan}$  herangezogen. Die Zeitspanne  $t_{V_i}$  vom Bewertungszeitpunkt  $T_0$  bis  $TAE_{Plan}$  enthält alle Ausführungszeiten sowie Übergangs- und Wartezeiten, die im geplanten Durchlauf anfallen.  $t_{Restschlupf}$  berechnet sich dabei wie folgt:

$$t_{Restschlupf} = TA_{Plan} - TAE_{Plan} \quad (4.3)$$

Sofern der letzte Arbeitsvorgang in der Steuerungsperiode  $TVE_{i,L}$ <sup>44</sup> gleichzeitig der letzte Arbeitsvorgang bis zum definierten Abgangstermin ist, gilt  $TVE_{i,L} = TAE_i$ . Abb. 4.5 stellt die betrachteten Zeitpunkte im Gantt-Diagramm dar.



**Abb. 4.5:** Darstellung der relevanten Zeitpunkte und Zeiten für die Berechnung der Verzugskosten am Beispiel eines Auftrags

Die Verzugskosten in der Zielfunktion, die sowohl reale als auch kalkulatorische Kosten beinhalten, werden in Abhängigkeit der zeitlichen Lage von  $TVE_{i,L}$  zwischen Plan- und Ist-Belegungsplan in drei Fälle unterschieden. Wird der letzte Arbeitsvorgang eines Auftrags ohne Verzug fertiggestellt, kann von einem termingerechten Auftragsabschluss ausgegangen werden. Wenn sich hingegen der Plan-Endtermin des letzten Arbeitsvorgangs verzögert, steigt auch bei vorhandenem Restschlupf das Risiko einer Verspätung, hier als exponentieller Verlauf dargestellt. Sobald keine Restschlupfzeit mehr vorhanden ist, verspätet sich der Auftrag mit Sicherheit, sodass in diesem Fall die Verzugskosten in Abhängigkeit der Abgangsterminabweichung heranzuziehen sind. Die Verzugskosten eines Auftrags  $K_{V_i}$  werden formal wie folgt ausgedrückt:

$$K_{V_i} = \begin{cases} 0 & \text{für } TVE_{Ist_{i,L}} \leq TVE_{Plan_{i,L}} \\ K_{V_{0,i}}^{\frac{t_{V_i}}{TAE_{Plan_{i,L}} - T_0}} & \text{für } TVE_{Ist_{i,L}} > TVE_{Plan_{i,L}}, t_{Restschlupf} > 0 \\ K_{V_i}(TAA) & \text{für } TVE_{Ist_{i,L}} > TVE_{Plan_{i,L}}, t_{Restschlupf} < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Die Verzugskosten in der Zielfunktion unterstützen die Steuerung hinsichtlich termingerechter Fertigstellung und beeinflussen somit die Zielgröße Termintreue

<sup>44</sup> Mit  $L$  wird der Arbeitsvorgang  $j$  bezeichnet, der im Auswahlfenster der Produktionssteuerung der letzte Arbeitsvorgang eines Auftrags ist.

positiv. Da diese nur eines von mehreren Elementen der Zielfunktion ist, wird erreicht, dass die Termineinhaltung mit anderen kostenverursachenden Faktoren abgewogen und so eine dem resultierenden Aufwand angemessene Termineinhaltung angestrebt wird. Von besonderer Bedeutung ist daher die Gestaltung der Kostenfunktion, die idealerweise über real anfallende Vertragsstrafen hinausgeht und möglichst alle quantifizierbaren Auswirkungen berücksichtigt.

Sobald der Planabgangstermin nicht mehr eingehalten werden kann, fällt bei alleiniger Berücksichtigung von fixen Verzugskosten die Wirkung hinsichtlich der Termineinhaltung weg, da für jede Planalternative dieselben Verzugskosten anfallen. Der betroffene Auftrag wird in diesem Fall zugunsten anderer Aufträge, deren Abgangstermin noch einzuhalten ist, nach hinten verschoben. Durch die Modellierung eines variablen Faktors, der von der Verzugszeit abhängig ist, wird diesem Effekt entgegengewirkt. Ausnahmen sind Aufträge, die vom Kunden nach Überschreiten des Liefertermins nicht mehr abgenommen werden. Die Kostenfunktion setzt sich somit aus einem Fixbestandteil  $K_{V_{0,i}}$  und einem variablen Anteil  $K_{V_{v,i}}(TAA)$  zusammen, wobei letzterer verschiedene Verläufe (z. B. linear, sprungfix) annehmen kann (vgl. auch Abb. 4.4). Formal ist dies wie folgt beschrieben:

$$K_{V_i}(TAA) = K_{V_{0,i}} + K_{V_{v,i}}(TAA) \quad (4.5)$$

Ein weiteres Steuerungspotenzial der Berücksichtigung von Verzugskosten erschließt sich durch die Integration von Eilaufträgen. Existierende Fertigungssteuerungsverfahren berücksichtigen Eilaufträge entweder gar nicht (z. B. durch Einhaltung einer initial festgelegten Reihenfolge) oder bevorzugen diese absolut. Besonders dringende Aufträge können im vorliegenden Ansatz neben einer Vorverlegung des Abgangstermins durch eine Erhöhung der Verzugskosten beschleunigt werden. Dies fördert die Termintreue von Eilaufträgen, die damit verbundenen Zusatzaufwände werden aber stets mitberücksichtigt und so die optimale Reaktion abgeleitet.

### 4.3.2.3 Rüstkosten

In der Fertigung fällt häufig für die Bearbeitung zweier aufeinanderfolgender Aufträge mit unterschiedlichen Bearbeitungsanforderungen zusätzlicher Aufwand in Form einer Umrüstung an, da die Maschine für die neue Bearbeitungsaufgabe andere Werkzeuge oder Vorrichtungen benötigt. Für die Dauer des Rüstvorgangs steht die Maschine nicht für die Fertigung zur Verfügung, sondern beansprucht kostenwirksame Faktoren wie Maschinenkapazität und Personal. Zudem entstehen häufig zusätzliche Kosten, z. B. für Werkzeugaufarbeitungen. Daher sind Rüstvorgänge als kostenrelevant zu werten. Zudem

verringert sich die Kapazität, sodass der Aufwand jedes zusätzlichen Rüstvorgangs zur Erfüllung der Termintreue gegenüber den entstehenden Ersparnissen in Form verringerter Verzugskosten abzuwägen ist.

Die Reihenfolgeabhängigkeit des Rüstaufwands ergibt sich zum einen durch den Wegfall von Rüstvorgängen bei der aufeinanderfolgenden Fertigung von Aufträgen, die dieselbe Einrichtung der Maschine erfordern, zum anderen durch eine aus dem Vorgängerauftrag resultierende Abhängigkeit des Rüstaufwands, z. B. weil ein Teil des Werkzeugs oder der Werkstückaufnahme übernommen werden kann (vgl. auch VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 198). Der Aufwand, der für das Rüsten einer Maschine von einem Arbeitsvorgang auf den darauffolgenden Arbeitsvorgang erforderlich ist, wird in der Regel aus einer Rüstmatrix (s. Tabelle 4.1) entnommen. Mit sinkendem Wiederholungsgrad der Aufträge wird zunehmend die Produktgruppe oder ein maschinenabhängiger Rüstzustand als Ordnungskriterium herangezogen, das wiederum in den Stammdaten des Auftrags oder des Arbeitsvorgangs zu hinterlegen ist.

**Tab. 4.1:** Rüstmatrix (Beispiel)

von: auf:	RZ 1	RZ 2	RZ 3	RZ 4
RZ 1	-	54 €	32 €	12 €
RZ 2	15 €	-	37 €	43 €
RZ 3	32 €	28 €	-	57 €
RZ 4	8 €	39 €	62€	-

Die Modellierung des Rüstaufwands erfolgt mit Hilfe eines maschinenbezogenen Index für die zu fertigenden Aufträge  $a^{45}$ , der Anzahl an Aufträgen  $A_k$ , die im Steuerungszeitraum auf Maschine  $k$  zu bearbeiten sind sowie den maschinenbezogenen Arbeitsvorgängen  $O_{k,a}$ . Jeder Arbeitsvorgang  $O_{k,a}$  entspricht dabei einem Arbeitsvorgang aus der jobbezogenen Modellierung  $O_{i,j}$  und ist eindeutig einer Spalte und Zeile in der Rüstmatrix zuzuordnen.

Die Gesamtrüstkosten berechnen sich aus der Summe der Rüstkosten an jeder Maschine, die sich wiederum aus der Summe der Kosten für die Rüstvorgänge ergeben. Der Rüstaufwand für den ersten Arbeitsvorgang wird dabei nicht berechnet, da dieser bereits in der vorherigen Steuerungsperiode berücksich-

---

<sup>45</sup> Der Index  $a$  gibt die Position des Arbeitsvorgangs in der Reihenfolge der Bearbeitung auf Maschine  $k$  an. Es gilt  $j = a$  für den betrachteten Arbeitsvorgang, sodass mit  $a - 1$  der Arbeitsvorgang bezeichnet wird, der zuvor auf Maschine  $k$  bearbeitet wurde.



tigt wird (periodenübergreifende Auftragsbearbeitung). Die Berechnung der Rüstkosten richtet sich nach der Granularität der verfügbaren Daten.

Die größten Differenzierungsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Aufträgen ergeben sich durch die direkte Angabe der Rüstkosten in der Rüstmatrix. Die Formel für die Berechnung der Rüstkosten lautet:

$$K_R = \sum_{k=1}^m K_{R_k} = \sum_{k=1}^m \sum_{a=2}^{A_k} K_{R_{k,a}}(RZ_{O_{k,a-1}}, RZ_{O_{k,a}}) \quad (4.6)$$

An Stelle der Rüstkosten können auch die Rüstzeiten herangezogen werden, die mit einem maschinenabhängigen Rüstkostensatz  $K_{R_{M_k}}$  zu multiplizieren sind. Eine Vereinfachung ist die Berücksichtigung fester Rüstzeiten, deren Höhe nicht von der Reihenfolge der Arbeitsvorgänge auf einer Maschine abhängig ist. Dabei wird für jeden erforderlichen Rüstvorgang eine maschinen- oder arbeitsvorgangsspezifische Rüstzeit herangezogen und mit dem Rüstkostensatz  $K_{R_{M_k}}$  multipliziert. Die Optimierung der Rüstkosten erfolgt in diesem Fall ausschließlich durch das Zusammenfassen von Aufträgen, zwischen denen nicht gerüstet werden muss. Analog zur Rüstzeit können hier auch direkte Rüstkosten berücksichtigt werden.

Generell wirken sich die Rüstkosten bei der Erstellung von Ablaufplänen in Form von rüstopimalen Reihenfolgen aus. Dies geschieht einerseits durch das Zusammenfassen von Aufträgen mit gleichem Rüstzustand, andererseits durch die Minimierung des Rüstaufwands bei der Reihenfolgebildung. Daher sind Rüstkosten ein Bestandteil der Zielfunktion.

#### 4.3.2.4 Beschleunigungskosten

Durch spezifische Maßnahmen, wie z. B. die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, kann die Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs verkürzt werden, um u. a. einen Abgangstermin einzuhalten und die Verspätungskosten zu senken. Im Gegenzug entstehen Kosten für erhöhten Verschleiß und andere Faktoren, sodass entsprechende Kosten für die Beschleunigung zu berücksichtigen sind. In der Praxis ist die Möglichkeit einer Beschleunigung von der Kombination der Auftrags- und Maschinencharakteristika abhängig und nur schwer allgemeingültig zu beschreiben. Aufgrund der hohen Komplexität der Berechnung sowie zur Ermittlung der Datengrundlage wird daher im Rahmen der Arbeit auf die Betrachtung der Beschleunigung bzw. der intensitätsmäßigen Anpassung verzichtet. Zudem kann angenommen werden, dass die im Arbeitsplan festgelegten Parameter der Produktionsplanung die bestmögliche Art der Bearbeitung darstellen und somit beizubehalten sind (s. auch Annahme AN 6).

### 4.3.2.5 Transportkosten

Transportkosten fallen durch den werkstattbedingten Transport der Aufträge zwischen den einzelnen Arbeitsstationen an. Bei Beibehaltung der geplanten Maschinenfolge ändern sich die Transportkosten nicht. Eine Änderung der Maschinenfolge bewirkt dagegen eine Änderung der Transportwege, sodass Transportkosten grundsätzlich zu berücksichtigen sind. Zudem kann eine kurzfristige Entscheidung für alternative Maschinenfolgen dazu führen, dass ein Auftrag, der bereits vor dem ursprünglich geplanten Arbeitssystem liegt, erneut transportiert werden muss. Analog treten Transportkosten auf, wenn zentrale Zwischenlagerungen im Rahmen der Steuerung vorgesehen werden oder wegfallen. Bei der Betrachtung aller zukünftigen Transporte fallen somit Transportkosten an, wenn der Auftrag an einer Maschine liegt, an der er nicht oder nicht mehr bearbeitet wird und keine Transportkosten, wenn der Auftrag an der entsprechenden Maschine für die Folgebearbeitung liegt. Die Transportkosten ergeben sich somit aus den positionsabhängigen Transportkosten  $K_{T_{i,j}}$  für Arbeitsvorgang  $O_{i,j}$  zu folgender Formel:

$$K_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} K_{T_{i,j}}(O_{i,j}) \quad (4.7)$$

Die positionsabhängigen Transportkosten  $K_{T_{i,j}}$  lassen sich durch die Differenz des Standorts  $S_{i,j}$ , an dem Arbeitsvorgang  $O_{i,j}$  durchzuführen ist, sowie dem Standort  $S_{i,j-1}$ , an dem der vorgelagerte Arbeitsvorgang  $j-1$  von Auftrag  $i$  durchzuführen ist bzw. durchgeführt wurde, ermitteln:

$$K_{T_{i,j}}(O_{i,j}) = K_{t_{i,j}}(S_{i,j}, S_{i,j-1}) \quad (4.8)$$

Der Wert von  $K_{T_{i,j}}$  ist der Transportkostenmatrix zu entnehmen. Analog zur Rüstkostenmatrix ist die Transportmatrix bzw. Transportkostenmatrix wie in Tabelle 4.2 abgebildet, aufgebaut. Die Standorte entsprechen in der Regel den zugeordneten Arbeitssystemen  $\mu_{i,j} \in \{M_1, \dots, M_m\}$ .

**Tab. 4.2:** Transportkostenmatrix (Beispiel)

	von $S_{i,j-1}$	$M_1$	$M_2$	...	$M_m$
nach $S_{0i,j}$					
$M_1$		-	50 €	...	75 €
$M_2$		50 €	-	...	60 €
...		...	28 €	...	...
$M_m$		75 €	60 €	...	-

Wie die Rüstkosten (vgl. Abschnitt 4.3.2.3) können die Transportkosten alternativ durch Multiplikation eines Transportkostensatzes  $K_t$  mit einer Wegstrecke oder durch die ausschließliche Betrachtung von Zuschlägen von Zusatztransporten ermittelt werden. Letzteres wird realisiert, in dem ein fixer Wert addiert wird, wenn der Auftrag von der ursprünglich eingeplanten Arbeitsstation an die Alternativstation transportiert werden muss. Basis ist hierfür der aktuelle Standort  $S_0$ . Sofern dieser nicht der geplante oder vorherige Standort ist, wird ein fixer Kostensatz  $K_{t_{fix}}$  für den Sondertransport addiert.

$$K_{T_{i,j}}(O_{i,j}) = \begin{cases} 0 & \text{falls } S_{0_{i,j}} = S_{i,j} \text{ oder } S_{0_{i,j}} = S_{i,j-1} \\ K_{t_{fix}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.9)$$

Die Berücksichtigung der Transportkosten bewirkt, dass bei der Auswahl von Alternativarbeitsgängen auch ein erhöhter Transportaufwand in der Fertigung durch die Korrektur der Auftragsstandorte anfällt.

#### 4.3.2.6 Fertigungskosten

Die Fertigungskosten werden durch die Belegung der Maschine zur Fertigung der Aufträge verursacht und entsprechen nach MILBERG (1992, S. 31) der Summe aus Maschinenkosten  $K_M$ , Lohnkosten  $K_L$ , Werkzeugkosten  $K_W$  und Gemeinkosten  $K_X$  des Betriebes. Die Maschinenkosten jeder Maschine  $k$  werden anhand des Maschinenstundensatzes  $K_{MH_k}$  gemessen, der sich nach VDI-RICHTLINIE 3258-1 (1962)<sup>46</sup> aus kalkulatorischen Kosten für Abschreibungen, Zinsen, Raum, Energie und Instandhaltung, dividiert durch die jährliche Nutzungszeit der Maschine, zusammensetzt.

Die Maschinenkosten ergeben sich durch Multiplikation des Maschinenstundensatzes mit der Belegungszeit des Arbeitsvorgangs  $t_{B_{i,j,k}}$ , ebenso wird mit den Lohnkosten verfahren, die durch Multiplikation der Belegungszeit mit einem Lohnkostensatz  $K_{LKS_k}$  errechnet wird. Die Belegungszeit entspricht aufgrund der separaten Berücksichtigung von Rüstzeiten der Auftragszeit  $t_{A_{i,j}}$  eines Arbeitsvorgangs. Werkzeugkosten und Gemeinkosten sind nur steuerungsrelevant, wenn sie durch reihenfolge- oder maschinenabhängigen Größen determiniert werden. Ist dies der Fall, können diese sowohl als fixe Größen oder durch Multiplikation eines Kostensatzes mit auftragsbezogenen Parametern (z. B. Belegungszeit, Auftragsgröße) in die Berechnung eingehen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vereinfacht fixe Werkzeug- und Gemeinkosten angenommen. Somit lassen sich die Fertigungskosten eines Bauteils wie folgt berechnen:

<sup>46</sup> Die VDI-Richtlinie 3258-1 wurde 1991 ersatzlos zurückgezogen.

$$K_{F_{i,j}} = [K_{MH_k} + K_{LKS_k}] \cdot t_{B_{i,j,k}} \quad (4.10)$$

Die gesamten Fertigungskosten, die in die Zielfunktion eingehen, entsprechen der Summe über alle Arbeitsvorgänge des Betrachtungszeitraums:

$$K_F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} K_{F_{i,j}}(O_{i,j}) \quad (4.11)$$

Die Berücksichtigung der Fertigungskosten in der Zielfunktion bewirkt, dass ein Verlagern von Arbeitsvorgängen auf teurere Alternatarbeitsplätze oder alternative Fertigungsverfahren mit den voraussichtlichen Ersparnissen hinsichtlich Verzugskosten oder anderen Faktoren verrechnet wird.

#### 4.3.2.7 Nichtnutzungskosten

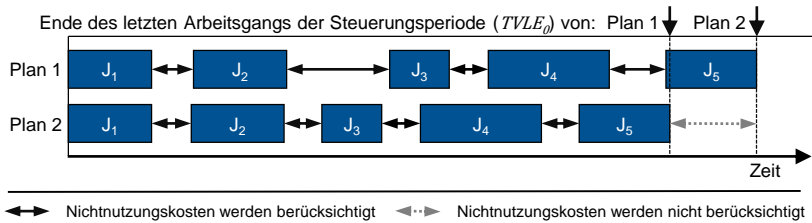
Die Berücksichtigung der Verzugskosten kann bewirken, dass weniger dringende Aufträge durch das Steuerungssystem in späteren Perioden verschoben werden, um durch eine Reduktion der Auslastung ein größeres Handlungsfeld für die Produktion dringender Aufträge zu schaffen. Um diesem entgegenzuwirken, ist ein Steuerungsinstrument erforderlich, das dem Schaffen von Leerzeiten entgegenwirkt. Ein probates Mittel ist die Berücksichtigung der entsprechenden Kosten für die Nichtnutzung bzw. dem Stillstand von Maschinenkapazitäten.

Nach HANSMANN (2006, S. 350) sind Stillstandszeiten nicht steuerungsrelevant, wenn die Kapazität der Produktion hoch genug ist, um geplante Liefertermine einhalten zu können. Dies ist dadurch begründet, dass durch die Vermeidung von Stillständen keine zusätzlichen Erlöse entstehen und keine Beeinflussung der Fixkosten möglich ist. Vermeidbare Leerkosten entstehen nur bei der Nichtabschaltung von Maschinen während einer Leerzeit. Bei Kapazitätsengpässen wirken sich Stillstände dagegen in Form von Lieferverzögerungen und damit verbundenen Erlösausfällen aus und sind entsprechend steuerungsrelevant (HANSMANN 2006, S. 351).

Da innerhalb der Steuerungsperiode ein fest vorgegebenes Produktionsprogramm definiert ist, kann nicht die gesamte Stillstandszeit verringert werden, sondern ausschließlich die zeitliche Lage der Stillstandszeiten beeinflusst werden (vgl. auch STEINRÜCKE 2007, S. 11). Um dies über die Kostenfunktion zu erreichen, sind Stillstände, die früher in der Steuerungsperiode liegen, stärker in Form von Kosten zu berücksichtigen als spätere. Dies ist zulässig, da angenommen werden kann, dass die Kapazität einer Maschine nach Bearbeitung aller vorgesehenen Aufträge für die Bearbeitung weiterer Aufträge zur Verfügung steht und Aufträge der Folgeperiode vorgezogen werden können oder alternativ

eine verfrühte Abschaltung der Maschine möglich ist, sodass keine Kosten gegen Periodenende mehr anfallen.

Somit beschränkt sich der Bewertungszeitraum für die Nichtnutzungskosten auf den Zeitraum, bis der letzte Arbeitsvorgang auf der jeweiligen Maschine in der Steuerungsperiode beendet wurde. Dies bewirkt, dass die eingeplanten Aufträge möglichst früh fertiggestellt werden. Die entsprechenden Zeiträume sind in Abb. 4.6 am Beispiel einer Maschine für zwei unterschiedliche Planalternativen dargestellt.



**Abb. 4.6:** Berücksichtigte Zeiten zur Berechnung der Nichtnutzungskosten

Die Maschinenkosten basieren meist auf einer durchschnittlichen Nutzungszeit. Größere Stillstandszeiten führen dazu, dass die mit der Belegungszeit verrechneten Kosten nur einen Teil der Gesamtkosten abdecken. Die während der Stillstandszeit anfallenden Kosten für kalkulatorische Abschreibungen und Zinsen sowie die Raumkosten sind somit anderweitig zu berücksichtigen. Zudem sind die Lohnkosten für die Maschinenbediener aufgrund der häufig unflexiblen Kapazitätsanpassungsmöglichkeiten ebenfalls auslastungsunabhängig und fallen auch bei Nichtnutzung an. Somit berechnen sich die Nichtnutzungskosten aus der Multiplikation des um den Leerkostenfaktor  $f_{L_k}$  reduzierten Maschinenstundensatzes mit der Stillstandszeit bis zum letzten Arbeitsgang der betrachteten Steuerungsperiode. Der entsprechende Zeitraum  $t_{NNZ_k}$  umfasst die Zeit zwischen dem Ende des letzten Arbeitsgangs der Steuerungsperiode  $TLVE_{0,k}$  und dem Bewertungszeitpunkt  $T_0$  abzüglich der Zeiten, in denen das Betriebsmittels durch Rüsten und Bearbeiten beansprucht wird. Die Anzahl betrachteter Arbeitsvorgänge  $A_k$  umfasst demnach alle Arbeitsvorgänge, die im Rahmen der Produktionssteuerung betrachtet werden.

$$K_N = \sum_{k=1}^m [f_{L_k} \cdot K_{MH_k} + K_{LKS_k}] \cdot t_{NNZ_k} \quad (4.12)$$

$$\text{mit } t_{NNZ_k} = TLVE_{0,k} - T_0 - \sum_{a=1}^{A_K} t_{A_k,a} - \sum_{a=1}^{A_K} t_{Rk,a}$$

### 4.3.3 Zielfunktion zur Kostenbewertung

Wie in Abschnitt 4.2 dargelegt, ist der Handlungsraum des Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung auf die zeitliche Zuordnung der Arbeitsvorgänge zu den jeweiligen Maschinen, analog zum JSSP, beschränkt. Demzufolge werden bei der Reihenfolgeoptimierung nur die Kostenbestandteile Verzugskosten, Rüstkosten und Nichtnutzungskosten beeinflusst. Aufgrund der fehlenden Neuordnung von Maschinen fallen weder spontane, ungeplante Sondertransporte an, noch sind unterschiedliche Maschinenkosten zu berücksichtigen, sodass die Transportkosten sowie Fertigungskosten nicht beeinflusst werden. Im vorgelagerten Störungsmanagement können durch die Erweiterung der Handlungsoptionen um eine Neuordnung der Maschinen dagegen alle Kostenbestandteile beeinflusst werden. Somit ergeben sich die in Tabelle 4.3 dargestellten Zuordnungen der Kostenbestandteile.

**Tab. 4.3:** Berücksichtigung der Kostenbestandteile in unterschiedlichen Reglerfunktionalitäten

Kostenbestandteil	Störungsmanagement	Reihenfolgeoptimierung
Verzugskosten $K_V$	●	●
Rüstkosten $K_R$	●	●
Transportkosten $K_T$	●	○
Fertigungskosten $K_F$	●	○
Nichtnutzungskosten $K_N$	●	●

● ist enthalten    ○ ist nicht enthalten

Die Zielfunktion der adaptiven Werkstattsteuerung lautet:

$$K_{ges} = K_V + K_R + K_T + K_F + K_N \tag{4.13}$$

Für den Optimierungsalgorithmus der Auftragsreihenfolge kann zur Verringerung des Rechenaufwands eine reduzierte Kostenfunktion herangezogen werden:

$$K_{red} = K_V + K_R + K_N \tag{4.14}$$

### 4.3.4 Ermittlung der Kostensätze

Für die zur Berechnung des Zielfunktionswertes erforderlichen Kostensätze sind reale Kosten, z. B. aus der internen Kosten- und Leistungsrechnung, generell

gegenüber fiktiven Kosten zu bevorzugen, da auf diese Weise die in der Praxis auftretenden Kostenunterschiede richtig abgebildet werden. Jedoch ist anzunehmen, dass nicht für alle kostenverursachenden Faktoren in der Praxis Daten vorliegen. Vor allem im Bereich der Verzugskosten sind die Auswirkungen auf den Kunden oft nicht messbar, sodass hier kalkulatorische Kosten angesetzt werden müssen. So wirkt sich z. B. ein Lieferverzug in der Regel auf die Kundenzufriedenheit aus, der Einfluss auf zukünftige Erlöseinbußen ist allerdings sehr schwer zu quantifizieren (vgl. LÖDDING 2008, S. 37). Wenn dieser Effekt zu hoch oder zu niedrig angesetzt wird, werden nicht die realen Aufwände angesetzt, was zu verzerrten Reihenfolgeentscheidungen führt.

Das Ziel ist die Ermittlung der aus verschiedenen Auftragsreihenfolgen resultierenden Kostenunterschiede, nicht das Treffen einer Aussage über die gesamten Produktionskosten. Aus diesem Grund sind besonders die Verhältnisse zwischen den Aufwänden und Nutzen der einzelnen Maßnahmen von Bedeutung. Die absolute Höhe sowie reihenfolgeunabhängige Kostengrößen sind dabei nicht von Relevanz.

## 4.4 Datenmodell

Das in dieser Arbeit beschriebene System zur adaptiven Werkstattsteuerung erfordert eine hohe Datenverfügbarkeit. In Abb. 4.7 sind die erforderlichen Daten sowie deren Beziehungen dargestellt. Soweit in dieser Arbeit definiert, sind die entsprechenden Formelzeichen den Attributen in Abb. 4.7 ange stellt. Jedes Objekt ist durch eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) gekennzeichnet. Dagegen unterscheiden sich die Ablaufpläne durch den Bezug im Steuerungskontext, nachfolgend als Ablaufplantyp bezeichnet, und existieren jeweils nur ein einziges Mal.

Schwerpunkte des Datenmodells sind zum einen die Werkstätten sowie die darin enthaltenen Maschinen, zum anderen die Aufträge mit den zugehörigen Arbeitsvorgängen. Die Matrizen für Übergangszeiten und Transportkosten sind werkstattspezifische Daten, da diese Beziehungen zwischen den einzelnen Maschinen beschreiben. Maschinenspezifische Daten sind dagegen der Maschinenstundensatz, der Leerkostenfaktor sowie die Matrix der Rüstzeiten und -kosten (Alternative 1 aus Abschnitt 4.3.2.3). Lohnkostensatz sowie Schichtmodell können sowohl werkstatt- als auch maschinenspezifisch sein. An dieser Stelle wurde ausschließlich letztere Alternative dargestellt. Des Weiteren ist der aktuelle Zustand der Maschine (z. B. gestört, wartend, in Bearbeitung), der mit jedem Wechsel des Betriebszustands aktualisiert wird, Bestandteil der maschinenspezifischen Daten.

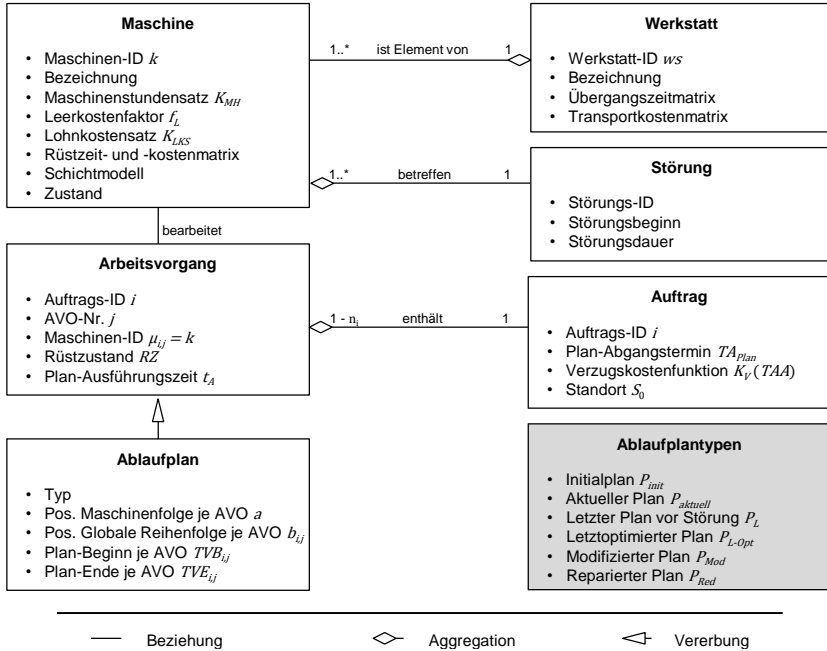


Abb. 4.7: Datenmodell der adaptiven Werkstattfertigung

Zur Beschreibung der Maschinenstörungen sind neben der Störungs-ID auch der Beginn sowie die voraussichtliche Dauer der Störung erforderlich (vgl. auch ARPING 1977, S. 80f.).

Die Auftragsdaten enthalten den Plan-Abgangstermin und die Verzugskostenfunktion, der Standort wird mit jedem Ortswechsel aktualisiert. Darüber hinaus setzt sich das Auftragsmodell aus den zugehörigen Arbeitsvorgängen zusammen, denen jeweils eine Maschine, ein Rüstzustand und eine Plan-Ausführungszeit zugeordnet sind.

Durch die Terminierung der Arbeitsvorgänge ergibt sich der Ablaufplan, wobei im Rahmen der Steuerung zu Vergleichszwecken zwischen den sechs unter *Ablaufplantypen* aufgeführten Typen unterschieden wird (S. Abb. 4.7). Aus einem Ablaufplan kann zudem die Position jedes Arbeitsvorgangs in der Maschinenfolge sowie der globalen Reihenfolge abgeleitet werden.

Das Datenmodell dient der Übersicht der erforderlichen Daten und kann in Abhängigkeit der Systemumgebung in der Umsetzung entsprechend gestaltet werden.



## **5 Störungsmanagement**

Dieses Kapitel umfasst das im Reglermodul (s. Abschnitt 4.2) eingebettete regelbasierte Störungsmanagement. Um dem festgestellten Handlungsbedarf hinsichtlich der Störungsklassifizierung zu begegnen (vgl. Abschnitt 2.4), erfolgt zunächst eine neuartige Klassifizierung der Störungen (Abschnitt 5.1). Darauf aufbauend wird die Gültigkeitswiederherstellung des zugrundeliegenden Ablaufplans nach Eintreten einer Störung sowie die Bewertung der Auswirkungen (Abschnitt 5.2) beschrieben. Zudem werden auf Basis der Störungsklassen spezifische Strategien abgeleitet, mit denen der Ablaufplan in Hinblick auf eine Verbesserung der Zielfunktion ohne tiefgreifende Änderungen adaptiert wird (Abschnitt 5.3).

### **5.1 Identifikationsbezogene Störungsklassifizierung**

#### **5.1.1 Ansatz**

Der Ansatz der identifikationsbezogenen Störungsklassifizierung begegnet dem Defizit bestehender Störungsklassen hinsichtlich einer umfassenden wirkungsbezogenen Klassifizierung. Darüber hinaus werden existierende Möglichkeiten zur Erfassung und Differenzierung von Störungen berücksichtigt. Auf diese Weise ist ein weitgehend automatisiertes Störungsmanagement möglich, auch wenn aufgrund fehlender automatisierter Erfassungsmöglichkeiten bestimmte Daten durch manuelle Eingaben zu erfassen sind (s. Abschnitt 7.5). Ein weiteres Ziel dieser Klassifizierung ist das Schaffen einer Möglichkeit zur zielgerichteten Reaktion auf Störungen durch störungsklassenbezogene Strategien. Über die Herstellung eines Bezugs dieser Klassen zu möglichen Störungsursachen wird zudem aufgezeigt, wie die Störungen auf Werkstattebene zu identifizieren sind.

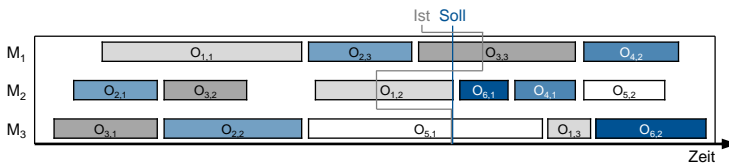
#### **5.1.2 Störungsklassen**

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Klassifizierung der Störungsereignisse beruht auf der Annahme, dass Störungen im Lauf der Fertigung nicht zu vermeiden sind und in der Regel erst in der manifesten Phase des Störverlaufs (s. Abb. 2.6 auf S. 49) sichtbar werden. Der Handlungsraum des Störungsmanagements beschränkt sich somit auf reaktive Maßnahmen, mit denen die

negativen Auswirkungen der Störungen zeitnah zu begrenzen sind. Da sich das Störungsmanagement auf die operative Ausführung bezieht, ist deren Wirkung auf den Ablaufplan zur Störungserkennung das entscheidende Kriterium für die Störungsklassifizierung. Im Gegensatz zum Ansatz von SCHUH ET AL. (2014a, vgl. S. 49) ermöglicht diese Klassifizierung eine störungsunabhängige Zuordnung auf Basis messbarer Größen, auch bei unbekanntnen Störungen. Die im Folgenden beschriebenen Kategorien *Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs*, *Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots*, *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* und *Reduzierung der Kapazitätsnachfrage* fassen somit Störereignisse zusammen, die sich auf gleiche Weise auf den Ablaufplan auswirken, auch wenn unterschiedliche Ursachen vorliegen können.

### 5.1.2.1 Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs

Der Ansatz einer zentralen Produktionssteuerung setzt voraus, dass der reale Produktionsverlauf analog zum zugrundeliegenden Ablaufplan verläuft. In der Realität wird hingegen eine Deckungsgleichheit der Ist- und Plan-Zeitpunkte aufgrund von technischen Kleinstörungen (vgl. REITHOFER 1987, 130f.) und ungenauen Planwerten nicht zu erreichen sein. Innerhalb eines Toleranzbereichs bleiben die resultierenden Planabweichungen ohne Auswirkungen auf den weiteren Verlauf bzw. werden durch gegenläufige Abweichungen wieder ausgeglichen. Sobald Verzögerungen auftreten, die eine verspätete Auslieferung oder eine Störung des Auftragsdurchlaufs auf anderen Maschinen zur Folge haben, ist die Abweichung dagegen als Störung zu klassifizieren und deren Auswirkungen auf den weiteren Verlauf abzuschätzen. Abb. 5.1 zeigt beispielhaft eine Situation, in der eine Plan-Ist-Abweichung vorliegt. Während der Arbeitsvorgang  $O_{3,3}$  auf Maschine  $M_1$  bereits weiter fortgeschritten ist, als im Ablaufplan definiert, ist Arbeitsvorgang  $O_{1,2}$  auf Maschine  $M_2$  noch nicht fertiggestellt, obwohl dies nach Plan vorgesehen ist. Dies führt voraussichtlich zu einer Verzögerung der nachfolgenden Arbeitsvorgänge  $O_{6,1}$  und  $O_{4,1}$  auf Maschine  $M_2$ . Die zugehörigen Aufträge  $J_1$  und  $J_6$  werden erst später auf Maschine  $J_3$  bearbeitet und können so ihre Verspätung wieder aufholen. Hingegen ist anzunehmen, dass aufgrund der geringen Übergangszeit von Auftrag  $J_4$  von Maschine  $M_2$  auf  $M_1$  der Arbeitsvorgang  $O_{4,2}$  verspätet beginnt. Somit weitet sich der Verzug auf Maschine  $M_2$  aus, sodass eine steuernde Reaktion erforderlich ist.



**Abb. 5.1:** Beispielhafte Darstellung der Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs

Eine verfrühte Fertigstellung, wie sie im Beispiel bei Auftrag  $J_3$  zu erwarten ist, wirkt sich nicht direkt negativ auf den Zielfunktionswert aus. Eine ausbleibende Reaktion führt in einem solchen Fall dazu, dass Potenziale in Form von freierwerdenden Kapazitäten nicht genutzt werden.

Die Ursachen dieser Störungsklasse sind sehr vielfältig. In Anlehnung an die von PATIG (2001, S. 11ff.) aufgeführten Ereignisse sind dies insbesondere längere oder kürzere Bearbeitungszeiten als ursprünglich veranschlagt, da die Planwerte vor allem in der Einzel- und Kleinserienfertigung nie genau vorherzusagen sind. Ferner wirken sich auch technische Kleinstörungen durch eine Verlängerung der Bearbeitungszeit aus, da diese in der Regel nicht erfasst und direkt vom Werker behoben werden (REITHOFER 1987, S. 66). Auch verspätete sowie falsche Material- und Werkzeuganlieferungen führen dazu, dass Aufträge später begonnen oder unterbrochen werden und dementsprechend die jeweiligen Zeitpunkte von denen im geplanten Verlauf abweichen. Die ungeplante Reihenfolgeänderung durch den Werker, die sowohl durch einen mangelnden Informationsfluss als auch durch eine willkürliche oder erfahrungsbedingte Vertauschung erfolgen kann und sich nicht vollständig vermeiden lässt, wirkt sich ebenfalls als Abweichung von Plan- und Ist-Werten aus. Daher ist hier auch ein korrigierender Eingriff notwendig, um den Ablaufplan an die realen Gegebenheiten anzupassen.

### 5.1.2.2 Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots

Ein ungeplanter Ausfall eines Arbeitssystems führt dazu, dass das Kapazitätsangebot für die Dauer des Ausfalls verringert ist. Ursachen für diese Ausfälle sind neben Maschinenausfällen aufgrund von technischen Defekten (s. Abb. 5.2) auch abwesende Mitarbeiter, sodass die erforderlichen Tätigkeiten an der Maschine nicht ausgeführt werden. Darüber hinaus können auch spontane Instandhaltungsarbeiten zu einer temporären Reduzierung des Kapazitätsangebots führen.

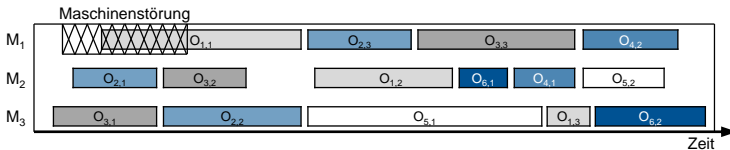


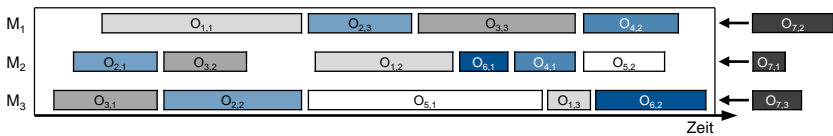
Abb. 5.2: Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots am Beispiel eines Maschinenausfalls

Eine temporäre Erhöhung des Kapazitätsangebots ist dagegen als unwahrscheinlich zu betrachten. In der Realität würde dies dem Fall entsprechen, dass entweder eine defekte Maschine spontan wieder einsatzbereit ist oder ein

nicht eingeplanter Mitarbeiter unvorhergesehen zur Arbeit bereitsteht. Auf eine weitere Betrachtung wird daher verzichtet.

### 5.1.2.3 Erhöhung der Kapazitätsnachfrage

In einigen Fällen kann es dazu kommen, dass sich die Kapazitätsnachfrage, z. B. durch die erforderliche Einplanung neuer Aufträge (s. Abb. 5.3) oder Arbeitsvorgänge, erhöht. Gründe hierfür sind unter anderem eingehende Eilaufträge oder die Erhöhung der Auftragspriorität eines für spätere Perioden eingeplanten Auftrags, zusätzliche Arbeitsgänge in Folge von Nacharbeit, die Nachproduktion von Ausschussteilen, Fehlteile, Materialschwund oder in den Stammdaten fehlerhaft hinterlegte Arbeitspläne (sog. Stammdatenstörungen).

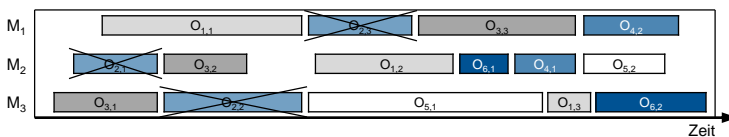


**Abb. 5.3:** Erhöhung der Kapazitätsnachfrage am Beispiel des Eingangs eines neuen Auftrags

Darüber hinaus kann es als Folge stetiger Verspätungen zu einer Erhöhung der Kapazitätsnachfrage für die verbleibende Steuerungsperiode, ausgedrückt durch eine steigende Auslastung im entsprechenden Zeitbereich, kommen. Sofern die verbleibende Zeit unter Berücksichtigung der Maschinenverfügbarkeit nicht mehr ausreicht, um die im Steuerungszeitraum vorgesehenen Aufträge zu fertigen, ist dies ebenfalls als Störung zu werten.

### 5.1.2.4 Reduzierung der Kapazitätsnachfrage

Der Wegfall von Aufträgen oder einzelnen Arbeitsvorgängen reduziert die Kapazitätsnachfrage. Die Plantermine der restlichen Aufträge bleiben gültig, durch freiwerdende Kapazitäten entstehen aber Nichtnutzungskosten, deren Potenziale im Rahmen der Steuerung auszunutzen sind. Diese Art der Störung ist in Abb. 5.4 dargestellt.



**Abb. 5.4:** Reduzierung der Kapazitätsnachfrage am Beispiel der Stornierung eines Auftrags

Ursachen für die Reduzierung der Kapazitätsnachfrage sind u. a. kundenseitige Stornierungen, wegfallende Arbeitsgänge oder, analog zur Erhöhung der Kapazitätsnachfrage, Stammdatenstörungen.

### 5.1.2.5 Überlagerung von Störungsklassen

Die vier vorgenannten Störungsklassen bilden die Basis für das im Folgenden vorgestellte Störungsmanagement. Das grundlegende Unterscheidungskriterium ist dabei der Effekt, den die Störungen auf den zugrundeliegenden Plan haben. Im nachfolgenden Abschnitt wird zudem auf die eindeutige Störungsidentifizierung eingegangen.

Die Störungsklassen treten nicht ausschließlich isoliert auf, sodass eine Störung, die aufgrund ihres Ursprungs und ihrer Wirkung in einer anderen Störungsklasse auftritt, zunächst als Plan-Ist-Abweichung erkannt wird. Dies ist bei einer temporären Reduzierung des Kapazitätsangebots der Fall, bei der in der Regel ein sofortiger Auftragsverzug eintritt. Zudem kann auch die Erhöhung oder Reduzierung der Kapazitätsnachfrage zunächst an Abweichungen zwischen Ist- und Plan-Daten erkannt werden. Sobald ergänzende Daten vorliegen, kann die Störung einer anderen Klasse zugeordnet werden. Steuerungsmaßnahmen sind dabei stets auf Basis der aktuell vorliegenden Störungsklasse zu treffen.

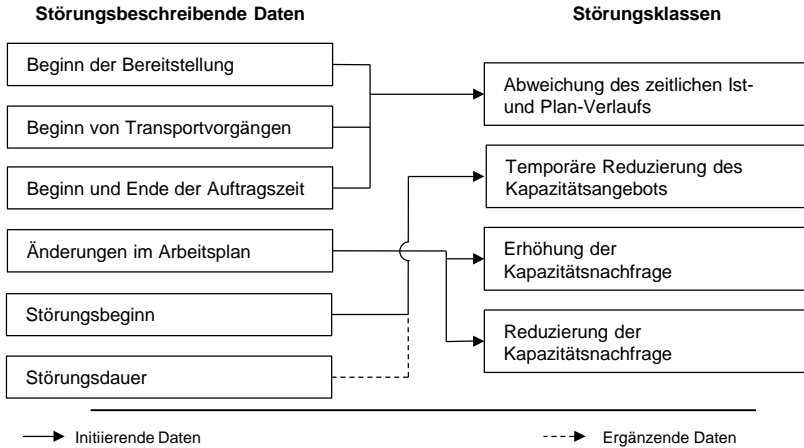
### 5.1.3 Störungsidentifikation

#### 5.1.3.1 Daten zur eindeutigen Störungsklassifizierung

Auftretende Störungen sind anhand der sie beschreibenden Daten eindeutig zu den im vorangegangenen Abschnitt definierten Störungsklassen zuzuordnen. Die entsprechenden Beziehungen sind in Abb. 5.5 dargestellt.

*Abweichungen des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs* werden durch einen Vergleich der ortungsbasiert abgeleiteten Beginn- und Endzeitpunkte der einzelnen Auftragszeiten mit den entsprechenden Zeitpunkten im zugrundeliegenden Ablaufplan ermittelt. Des Weiteren ist anhand des Transportbeginns durch Additionen einer erfahrungsbasierten Mindesttransportdauer der frühestmögliche Zeitpunkt zu berechnen, zu dem die Bearbeitung des entsprechenden Auftrags auf dem vorgesehenen Arbeitssystem beginnen kann. Somit können Abweichungen frühzeitig erkannt und entsprechende Reaktionen eingeleitet werden. Das Datum des Bereitstellungsbeginns ermöglicht die frühzeitige Auskunft darüber, ob der als nächstes zur Bearbeitung vorgesehene Auftrag bereitsteht. Ist dies nicht der Fall, kann eine Reaktionsmaßnahme angestoßen werden.

Störmeldungen, die über die Maschinendatenerfassung bereitgestellt werden, schließen auf den temporären Ausfall der entsprechenden Maschine und sind somit initiiierendes Ereignis für die Störungsklasse *temporäre Reduzierung des*



**Abb. 5.5:** Verknüpfung der verfügbaren Betriebsdaten mit den Störungsklassen

*Kapazitätsangebots.* Analog ist mit manuell erzeugten Störmeldungen zu verfahren. In beiden Fällen ist als ergänzende Information zwingend die voraussichtliche Stördauer erforderlich. Diese kann wissensbasiert aus detaillierten Informationen der Störmeldung abgeleitet oder manuell durch eine Anfrage bei der zuständigen Person angefordert werden. Sofern die Störmeldungen ausbleiben oder die Störungsdauer fehlt, ist eine Maschinenstörung aufgrund der fehlenden Informationsbasis in die Störungsklasse *Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlauf* einzuordnen (vgl. Abschnitt 5.1.2.5).

Werden Änderungen im Arbeitsplan vorgenommen, ist die Art der Änderung (z. B. Hinzufügen eines Auftrags) automatisiert abzuleiten und eine auftretende Störung wissensbasiert entweder in die Klasse *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* oder in die Klasse *Reduzierung der Kapazitätsnachfrage* einzuordnen. Sofern eine Änderung Merkmale beider Störungsklassen enthält, ist aufgrund der meist größeren negativen Auswirkungen die Klasse *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* zu definieren.

Darüber hinaus kann die Auslastung  $\Upsilon$  der jeweiligen Maschine als zusätzliche Information zur Störungszuordnung herangezogen werden. Die Auslastung entspricht dem Quotienten von Belegungszeiten und verbleibender Zeit innerhalb der Steuerungsperiode.

$$\Upsilon_k = \frac{\sum_{a=AktO}^{A_k} t_{B_{a,k}}}{TLVE_{1,k} - T_0} \quad (5.1)$$

Wenn die Auslastung steigt und gleichzeitig Änderungen am Arbeitsplan vorgenommen werden, ist eine *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* zu klassifizieren. Bei sinkender Auslastung in Kombination mit Änderungen am Arbeitsplan ist es entsprechend die *Reduzierung der Kapazitätsnachfrage*. Wenn ausschließlich eine Änderung der Auslastung zu verzeichnen ist, handelt es sich um eine *Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs*.

Eine sehr hohe Auslastung führt zu einer Überbeanspruchung der Kapazität (vgl. Abschnitt 5.1.2.3). Daher ist bei einer Auslastung von nahezu 100 % auch ohne Veränderung des Arbeitsplans eine *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* (anstatt *Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlauf*) zu klassifizieren, um zielgerichtet zu reagieren. Diese Klassifizierung kann aufgrund der Initiierung durch eine Abweichung zwischen Ist- und Plan-Verlauf ausschließlich nachträglich erfolgen, da die Auslastung erst nach der Gültigkeitswiederherstellung des Plans (s. Abschnitt 5.2) berechnet werden kann.

### 5.1.3.2 Vorgehen zur Störungsklassifizierung

Das Vorgehen zur Störungsklassifizierung ist in Abb. 5.6 dargestellt und wird durch einen Abgleich der Plan- und Ist-Werte, durch eine Störmeldung (manuell oder automatisch) oder durch Änderungen im Arbeitsplan angestoßen. Notwendige, aber nicht vorhandene Daten werden durch das System über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (Eingabe Störbeginn bzw. -dauer) angefordert und bei ausreichender Datenlage nach der im vorigen Abschnitt beschriebenen Zuordnung eine Klassifizierung vorgenommen.

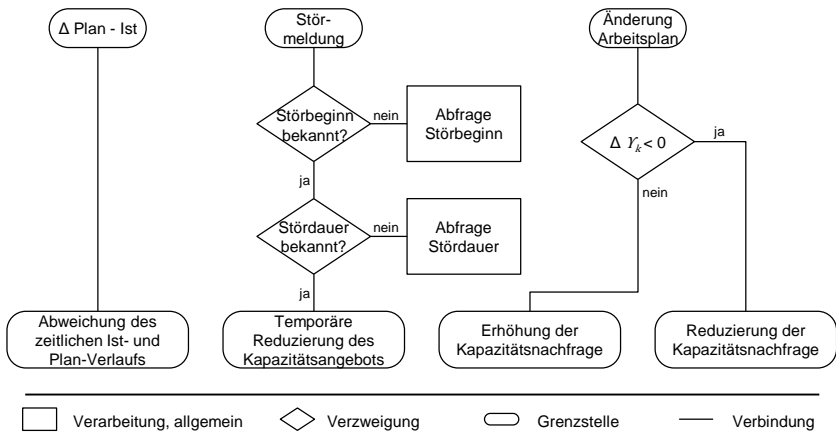


Abb. 5.6: Ablauf der Störungsklassifizierung (Darstellung nach DIN 66001 1983)

Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die ausschließlich auf vordefinierte Ereignisse reagieren können,<sup>47</sup> ist durch die identifikationsbezogene Störungsklassifizierung eine wesentlich größere Bandbreite an Ereignissen in der Fertigung abgedeckt, um eine Reaktion im Sinne der Produktionssteuerung zu initiieren. Auch unbekannte Störungen können, sofern sie sich anhand ihrer beschreibenden Daten in eine Störungsklasse einordnen lassen, berücksichtigt werden.

### 5.2 Gültigkeitswiederherstellung und Störungsbewertung

Es ist anzunehmen, dass Störungen häufig eintreten und sich auf den Zielfunktionswert auswirken (vgl. Abschnitt 1.2.1), sodass eine Reaktion erforderlich ist. Dabei ist zur Vermeidung von Planungsnervosität (vgl. Abschnitt 1.2.3) ein Kompromiss zwischen Adaption und Ignoranz zu finden. Eine häufige Adaption verbessert den Zielwert, erhöht hingegen die Nervosität des Systems. Aus diesem Grund ist in gewissen Situationen die Akzeptanz einer Verschlechterung der Zielfunktion gegenüber einer Umplanung zu bevorzugen. Bei der Adaption wird im Rahmen des Störungsmanagements versucht, mit einfachen Maßnahmen eine Verschlechterung des Zielwerts zu vermeiden. Wenn sich der Zielwert durch die Störung so stark verschlechtert, dass dieser durch Umplanungsmaßnahmen nicht annähernd in Größenordnungen des ursprünglichen Wertes zurückreicht, wird die Optimierung der Auftragsreihenfolge angestoßen, um unter der gegebenen Situation den bestmöglichen Produktionsablauf zu erreichen.

Um die entsprechenden Entscheidungen zu treffen, ist zunächst nach dem Erkennen einer Abweichung eine Bewertung der Störung durchzuführen. Diese besteht aus zwei Elementen, zunächst der Wiederherstellung eines gültigen Ablaufplan (Abschnitt 5.2.1) und im Anschluss die Bewertung der Störungsauswirkungen (Abschnitt 5.2.2). Im Folgenden wird der Ablauf näher beschrieben.

#### 5.2.1 Wiederherstellung der Gültigkeit des Ablaufplans

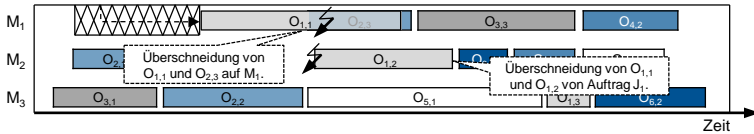
Durch störungsbedingte Abweichungen, insbesondere der Start- und Endzeitpunkte der Arbeitsvorgänge, verliert der zugrundeliegende Ablaufplan seine Gültigkeit. Aufgrund der starken Abhängigkeiten der durch ungerichtete Materialflüsse der Aufträge miteinander verbundener Maschinen führt ein ausschließliches Aktualisieren der entsprechenden Zeitpunkte dazu, dass Randbedingungen im Plan verletzt werden. Das Beispiel in Abb. 5.7 zeigt, wie durch das ausschließliche Aktualisieren von Arbeitsvorgang  $O_{1,1}$  sowohl die

---

<sup>47</sup> Als Beispiel sei hier der Ansatz von KREIMEIER (1987, S. 139) herangezogen, bei dem ausschließlich eine Aktualisierung erfolgt, wenn manuell Arbeitsgänge verschoben werden, Arbeitsgänge später als geplant abgemeldet werden oder unvorhersehbare Störungen eingetreten sind.



Startdaten der nachfolgenden Aufträge auf Maschine  $M_2$  als auch das Startdatum des nachfolgenden Arbeitsvorgangs  $O_{1,2}$  verletzt werden. Somit erfordert die Wiederherstellung der Gültigkeit einen einfachen Algorithmus, der die Anpassungen an die Ist-Situation mit niedrigem Aufwand ermöglicht.



**Abb. 5.7:** Verletzung von Randbedingungen bei ausschließlicher Anpassung der Zeiten des betroffenen Arbeitsvorgangs

Der aktuelle, aber ungültige Ablaufplan  $P_{Aktuell}$  wird bei der Herstellung der Gültigkeit nicht verworfen, sondern als Vergleichsbasis  $P_L$  für die Bewertung des Erfolgs der Steuerungsmaßnahmen herangezogen.

Entsprechende Maßnahmen zur Anwendung auf den zentralen Ablaufplan, im Folgenden auch als Reparaturverfahren bezeichnet, sind das Right- und Left-Shifting<sup>48</sup> (s. Abb. 5.8a; vgl. auch BRACKEL 2009, S. 42) sowie das daraus abgeleitete Einplanen mit zusätzlichem Right-Shifting für neue Arbeitsvorgänge und Aufträge (s. Abb. 5.8b).

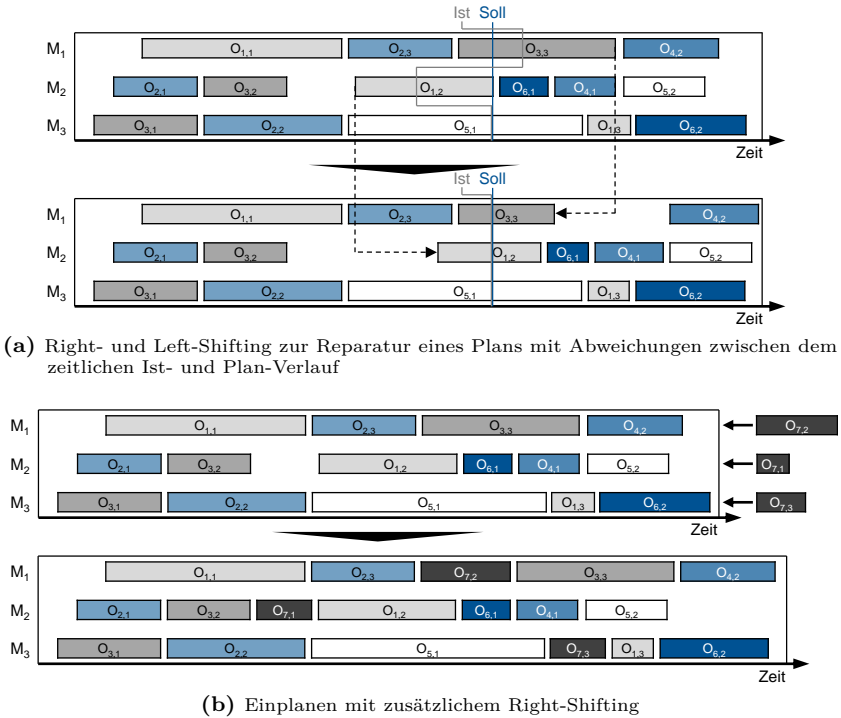
Aufgrund unterschiedlichen Auswirkungen von Störungen in den einzelnen Störungsklassen ergibt sich die in Tabelle 5.1 dargestellte Zuordnung der Reparaturverfahren zu den Störungsklassen.

**Tab. 5.1:** Zuordnung der Reparaturverfahren zur den Störungsklassen

Störungsklasse	Reparaturverfahren
Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs	Right-Shifting (Verspätung); Left-Shifting (Verfrühung)
Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots	Right-Shifting
Erhöhung der Kapazitätsnachfrage	Einplanen + Right-Shifting
Reduzierung der Kapazitätsnachfrage	Left-Shifting

Bei Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs findet ein Right- (bei Verspätung) oder Left-Shifting (bei verfrühter Fertigstellung) statt. Wenn sich

<sup>48</sup> Auch als Rechts- bzw. Linksverschiebung bezeichnet (vgl. NEBL 2004, S. 504).



(a) Right- und Left-Shifting zur Reparatur eines Plans mit Abweichungen zwischen dem zeitlichen Ist- und Plan-Verlauf

(b) Einplanen mit zusätzlichem Right-Shifting

**Abb. 5.8:** Verschiedene Formen des Right- und Left-Shifting zur Reparatur eines Plans

das Kapazitätsangebot reduziert, werden eingeplante Aufträge nicht produziert. Durch das Right-Shifting wird im Plan die sich daraus resultierte Verschiebung der Aufträge in die Zukunft nachvollzogen. Im Falle zusätzlicher Aufträge oder Arbeitsvorgänge sind diese zunächst einzuplanen und die dadurch beeinflussten späteren Arbeitsinhalte in die Zukunft zu verschieben (Right-Shifting). Bei einer Reduzierung der Kapazitätsnachfrage sind hingegen die entstehenden Potenziale auszunutzen. Dies wird durch ein Left-Shifting erreicht. Der reparierte Plan wird im Folgenden als  $P_{Rep}$  bezeichnet.

### 5.2.2 Störungsbewertung

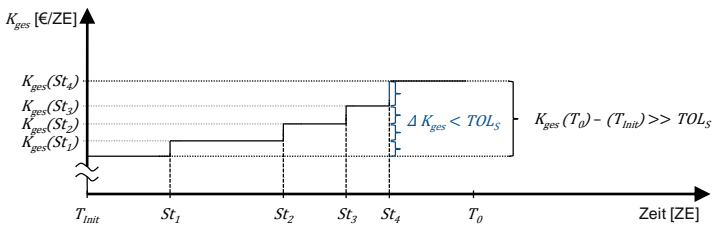
Im Anschluss an die Wiederherstellung eines gültigen Ablaufplans erfolgt die Bewertung der Störung. Grundlage für die Bewertung ist die Zielfunktion der Gesamtkosten (s. Formel 4.13). Die Entscheidung, ob eine Störung ignoriert wird oder eine Reaktion erfolgt, wird anhand eines Schwellwertes, der soge-

nannten Störtoleranz  $TOL_S$  getroffen. Dieser kann als relative oder absolute Veränderung des Zielfunktionswerts zwischen dem letzten Plan vor der Störung  $P_L$  und dem reparierten, wieder gültigen Plan  $P_{Rep}$  definiert werden. In dieser Arbeit beschränken sich die Ausführungen auf relative Veränderungen, eine Betrachtung absoluter Veränderungen ist bei Anpassung der Berechnungsformeln ebenso möglich. Eine Reaktion erfolgt, wenn der nachfolgende Zusammenhang eintritt.

$$\frac{K_{ges}(P_{Rep}) - K_{ges}(P_L)}{K_{ges}(P_L)} \geq TOL_S \quad (5.2)$$

Die Definition von  $TOL_S$  erfolgt werkstattspezifisch im Vorfeld unter Berücksichtigung mehrerer Faktoren. Ein wichtiger Faktor ist dabei die Störanfälligkeit der Produktion. Ein gering gesetzter Toleranzwert hat zur Folge, dass bereits bei sehr kleinen Störungen Umplanungsmaßnahmen angestoßen werden. Dies sorgt für eine weitgehende Erhaltung des Zielfunktionswertes und somit für geringe Verschlechterungen der logistischen Leistung. Bei einer Produktion mit hohem Störungsaufkommen werden Umplanungsmaßnahmen dagegen mit einer hohen Frequenz angestoßen und somit die Nervosität der Planung stark erhöht. Der konkrete Wert lässt sich für Anwendungsfälle simulativ ermitteln und hängt von der Höhe der gesamten reihenfolgeabhängigen Kosten ab.

Werden ausschließlich zwei aufeinanderfolgende Produktionspläne (vor und nach der Störung) betrachtet, besteht das Risiko, dass sich der Zielfunktionswert schleichend verschlechtert, da viele aufeinanderfolgende Störungen aufgrund ihrer geringen Einzelauswirkungen ignoriert werden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5.9 abgebildet.



- |              |                                    |         |                         |
|--------------|------------------------------------|---------|-------------------------|
| $K_{ges}$ :  | Zielfunktionswert                  | $St$ :  | Zeitpunkt einer Störung |
| $TOL_S$ :    | Schwellwert einer Störungsignoranz | $T_0$ : | Bewertungszeitpunkt     |
| $T_{init}$ : | Zeitpunkt des Produktionsstarts    |         |                         |

**Abb. 5.9:** Schleichende Verschlechterung des Zielwerts, wenn jede Änderung der Zielfunktion innerhalb der Toleranzgrenze  $TOL_S$  bleibt

Zur Vermeidung dieser Situation wird der Zielwert des reparierten Ablaufplans  $P_{Rep}$  mit dem Zielwert des Ablaufplans verglichen, der bei der letzten Optimierung der Auftragsreihenfolge als Ergebnis erzeugt wurde ( $P_{L-Opt}$ ). Die zugehörige Formel leitet sich analog zu Formel 5.2 ab.

$TOL_{SL-Opt}$  ist dabei mindestens genauso hoch zu wählen wie  $TOL_S$ . Für das Verhältnis gilt der Zusammenhang, je größer die Differenz von  $TOL_{SL-Opt}$  und  $TOL_S$ , desto geringer ist die Frequenz, in der eine Umplanung angestoßen wird. Gleichzeitig steigt mit der Differenz zwischen diesen Werten die Toleranz einer schleichenden Zielwertverschlechterung.

Im folgenden Abschnitt werden die möglichen Strategien vorgestellt, die zur Umplanung herangezogen werden können.

### 5.3 Strategien zur Störungsbehandlung

Nach WEINBRECHT (1993, S. 71) lassen sich die Auswirkungen auf die Zielfunktion von elementaren Umplanungsaktionen in einem gültigen Ablaufplan tendenziell abschätzen. Somit können zielgerichtete Maßnahmen zur Verbesserung des Zielfunktionswertes angestoßen werden. Zunächst werden Maßnahmen, mit denen die Auswirkungen von Störungen in Bezug auf die Zielfunktion reduziert werden können, diskutiert (Abschnitt 5.3.1). Im Anschluss erfolgt deren Zuordnung sowie Abfolgepriorisierung in sog. Maßnahmenkaskaden (Abschnitt 5.3.2). Abschließend wird der Gesamtprozess des hier beschriebenen Störmanagements dargestellt (Abschnitt 5.3.3).

#### 5.3.1 Maßnahmen zur Störungsbehandlung

Als Grundlage für die Auswahl möglicher Maßnahmen dient der Lösungsrahmen des Störungsmanagements von WELLER (2002, S. 75). Dieser basiert wiederum auf der Kapazitätsabstimmung nach REFA (1991b, S. 194ff.), wobei ausschließlich kurzfristig realisierbare Maßnahmen im Rahmen der adaptiven Produktionssteuerung herangezogen werden. Im Bereich der Anpassung des Kapazitätsangebots sind dies Ausweichressourcen zur strukturellen Anpassung sowie Mehrarbeit zur zeitlichen Anpassung. Die Kapazitätsnachfrage ist durch das Produktionsprogramm determiniert und kann abgeglichen, nicht aber in der Höhe angepasst werden. Mögliche Maßnahmen sind hier die Reihenfolgeänderung oder die überlappende Fertigung als zeitliche Bedarfsänderung. Die ebenfalls aufgeführte Terminänderung kann in der Praxis nur in Absprache mit dem Kunden erfolgen und ist somit nicht Bestandteil des Handlungsrahmens der adaptiven Werkstattsteuerung. Die von WELLER (2002, S. 75) vorgeschlagenen Mengenänderung durch die Nutzung von Beständen ist im Bereich der

Einzel- und Kleinserienfertigung durch die typischerweise individuellen Aufträge nicht möglich. Die weiterhin aufgeführte Mengenänderung durch Änderung von Losgrößen wird durch die Reihenfolgeänderung bereits gefördert, sodass die aufeinanderfolgende Fertigung zweier Aufträge mit demselben Rüstzustand den gleichen Effekt erzielt und sich durch eine Reduzierung des Rüstkostenanteils im Zielfunktionswert ausprägt. Die entsprechenden Maßnahmen sind zum Teil bereits in existierenden Ansätzen zur Werkstattsteuerung angewendet worden und dort umfassend beschrieben (vgl. WEINBRECHT 1993, S. 85ff.; WELLER 2002, S. 103ff.), sodass an dieser Stelle nur eine kurze Beschreibung der Maßnahmen Mehrarbeit, Reihenfolgeänderung durch sog. Jumping, Ausweichressourcen, Ausweichen auf Alternativarbeitspläne, überlappende Fertigung und Splitten erfolgt.

### 5.3.1.1 Mehrarbeit

Kurzfristige Mehrarbeit entsteht durch die Ableistung von Überstunden. Diese können den gesamten Betrieb betreffen oder einzelne Werkstätten oder Ressourcen. Dadurch wird das Kapazitätsangebot einer Steuerungsperiode erweitert, sodass Aufträge, die laut Ablaufplan erst am Folgetag fertiggestellt werden, noch an die anschließende Abteilung übergeben werden können. Diese Maßnahme dient vor allem der Reduzierung von Verspätungskosten. Eine Anordnung von Überstunden geschieht in der Regel in Abstimmung mit den betroffenen Personen, sodass diese Maßnahme nicht automatisiert durch das Steuerungssystem angewendet werden kann. Über eine manuelle Änderung der zeitlichen Verfügbarkeit kann die Mehrarbeit aber im Ablaufplan berücksichtigt und somit grundsätzlich angewendet werden. Da das in dieser Arbeit beschriebene System zur adaptiven Werkstattsteuerung autonom arbeiten soll, wird die Mehrarbeit im Folgenden nicht als Maßnahme zur Reaktion auf Störungen berücksichtigt, obgleich deren Anwendung grundsätzlich nicht ausgeschlossen wird.

### 5.3.1.2 Reihenfolgeänderung durch sog. Jumping

Die einfachste Form einer Reihenfolgeänderung ist das sog. *Right-Shifting and Jumping*<sup>49</sup> (vgl. BRÜGGEMANN 2010, S. 56), bei dem im Gegensatz zum Right-Shifting ausschließlich die durch die Störung direkt betroffenen Arbeitsgänge nach hinten verschoben werden und somit die im weiteren Verlauf folgenden Arbeitsgänge somit „übersprungen“ werden. Auf diese Weise wird der ursprüngli-

---

<sup>49</sup> WEINBRECHT (1993, S. 91) bezeichnet dasselbe Funktionsprinzip als *Vorziehen von Warteschlangennachfolgern*. Der Begriff der Warteschlange findet in der dezentralen Fertigungssteuerung Anwendung, da diese nicht im zentralen Ablaufplan direkt erkennbar ist. Somit wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff *Right-Shifting and Jumping* verwendet.

che Ablaufplan zum größten Teil aufrechterhalten bei weitgehender Vermeidung der Auswirkungen auf andere Aufträge. Ein Beispiel für das Right-Shifting and Jumping ist in Abb. 5.10 für Auftrag  $J_1$  (bestehend aus den Arbeitsvorgängen  $O_{1,1}$ ,  $O_{1,2}$  und  $O_{1,3}$ ), der auf Maschine  $M_2$  die Arbeitsvorgänge  $O_{6,1}$ ,  $O_{4,1}$  und  $O_{5,2}$  überspringt, dargestellt.

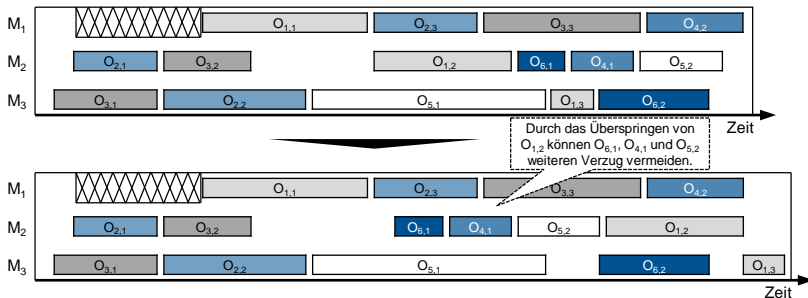


Abb. 5.10: Prinzip des Right-Shifting and Jumping

Analog zum Right-Shifting and Jumping kann ein sog. *Left-Shifting and Jumping* abgeleitet werden, bei dem entstehende Leerzeiten auf Maschinen (z. B. durch Wegfall von Arbeitsvorgängen) ausgenutzt werden und Arbeitsvorgänge durch Überspringen von Arbeitsvorgängen, die aufgrund von Randbedingungen nicht verschoben werden können, in diese Leerzeiten eingeplant werden.

### 5.3.1.3 Ausweichressourcen

Der Ausfall eines Betriebsmittels hat zur Folge, dass die betroffenen Aufträge vorerst nicht weiter gefertigt werden können. Insbesondere bei dringenden Aufträgen bietet es sich daher an, diese auf andere Betriebsmittel oder Maschinen umzuleiten, um Terminverzügen vorzubeugen. Voraussetzung ist, dass gleiche oder ähnliche Betriebsmittel für die betroffenen Arbeitsvorgänge zur Verfügung stehen und systemisch hinterlegt sind (vgl. ROSE 1989, S. 86ff.; KUPEC 1991, S. 111). Die Modellierung kann dabei entweder ressourcenbezogen (z. B. „Maschine  $M_1$  kann durch Maschine  $M_4$  ersetzt werden“) oder auftragsbezogen (z. B. „Arbeitsvorgang  $O_{5,2}$  kann auch auf Maschine  $M_4$  anstatt auf Maschine  $M_1$  ausgeführt werden“) erfolgen. Sofern sich die Rüst- und Bearbeitungszeiten unterscheiden, sind diese ebenfalls systemisch zu hinterlegen und entsprechend bei einer Umplanung heranzuziehen. Stehen mehrere Maschinen zur Auswahl, ist die Maschine mit der geringsten Auslastung zu wählen (KUPEC 1991, S. 111). WEINBRECHT (1993, S. 86f.) unterscheidet zudem das *Ausweichen ohne Verdrängung*, bei dem auf dem Ausweichsystem eine Belegungslücke im Umplanungszeitraum besteht, und dem *Ausweichen mit Verdrängung*, bei dem auf dem Ausweichsystem eingeplante Arbeitsgänge zeitlich verschoben

werden. Die Umplanungsmaßnahme des Verschieben auf Ausweichressourcen resultiert in Änderungen bei den Kostenbestandteilen Fertigungskosten (durch unterschiedliche Kostensätze und/oder Bearbeitungszeiten), Transportkosten (durch zusätzliche oder andere Transportwege) sowie Rüstkosten (durch andere Rüstreihenfolgen). Neben dem Ausfall von Betriebsmitteln kann diese Maßnahme genutzt werden, um die Auslastung eines Arbeitssystems zu reduzieren und damit zu entlasten. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn aufgrund von zunehmenden Verzögerungen die verbleibende Arbeitszeit eines Betriebsmittels in der Steuerungsperiode nicht mehr ausreicht, um den vorgesehenen Arbeitsinhalt zu bearbeiten.

### 5.3.1.4 Ausweichen auf Alternativarbeitspläne

Neben dem Ausweichen auf alternative Betriebsmittel können alternative Arbeitspläne eines Auftrags ausgewählt werden, um die Kapazität eines Betriebsmittels zu entlasten oder im Falle eines Ausfalls eine Weiterführung der betroffenen Aufträge zu gewährleisten. Im Gegensatz zur vollständig-reaktiven Produktionssteuerung wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass durch das vorgelagerte Planungssystem ein bevorzugter Arbeitsplan ausgewählt wurde, sodass die Alternativenauswahl nur im Fall einer Störung erfolgt. Voraussetzung für die Umsetzung ist eine systemische Abbildung dieser sog. nichtlinearen Arbeitspläne (vgl. BECKENDORFF 1991, S. 50ff.), z. B. durch Petri-Netze (vgl. Ansätze von BECKENDORFF 1991, S. 70ff. oder OSTGATHE 2012, S. 84ff.). Bei der nachfolgenden Anpassung des Ablaufplans ist darauf zu achten, dass keine Bedingungen bzgl. des Starttermins der darauffolgenden nicht-veränderten Arbeitsvorgänge verletzt werden. Bzgl. der Auswahl der Alternativen sind dieselben Kriterien anzuwenden wie bei Alternativressourcen.

### 5.3.1.5 Überlappende Fertigung

Um im Hinblick auf steigende Verzugskosten die Durchlaufzeit eines Auftrags zu reduzieren, ist die Überlappung bzw. überlappende Fertigung (vgl. ROSE 1989, S. 96ff.; REFA 1991a, S. 32ff.; KIENER ET AL. 2012, S. 264) eine Maßnahme, die durch Parallelisierung der Bearbeitung von zwei oder mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsvorgängen die Bearbeitungszeit sowie die Übergangszeit reduziert. Dabei wird die Auftragslosgröße in sog. Teillose bzw. Transportlosgrößen unterteilt und an das nachfolgende System weitergegeben. Dadurch erhöht sich der Transportaufwand, der Rüstaufwand bleibt, sofern ein Auftrag nicht durch einen anderen Auftrag unterbrochen wird, hingegen konstant. Weiterhin gilt die Bedingung, dass auf der nachfolgenden Maschine Leerzeiten zu vermeiden sind, d. h. diese darf erst mit der Bearbeitung beginnen, wenn die zur Verfügung stehende Teilmenge ausreicht, um bis zur Anlieferung der nächsten Teilmenge beschäftigt zu sein (WEINBRECHT 1993, S. 90). Eine Überlappung als Reaktion auf eine Verzögerung bei einer Maschinenstörung ist

in Abb. 5.11 für Auftrag  $J_1$  (bestehend aus den Arbeitsvorgängen  $O_{1,1}$ ,  $O_{1,2}$  und  $O_{1,3}$ ) dargestellt.

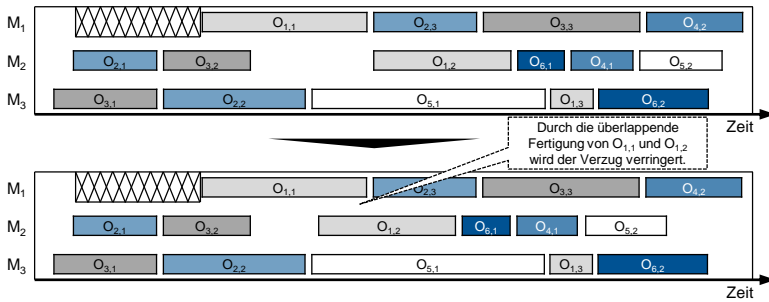


Abb. 5.11: Überlappende Fertigung

### 5.3.1.6 Splitten

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Auftragsdurchlaufzeit ist das sog. Splitten (vgl. ROSE 1989, S. 93ff.; REFA 1991a, S. 36f.; BELZ 1993, S. 46; WEINBRECHT 1993, S. 88f.; PATIG 2001, S. 21f.), auch als Lossplitting (vgl. KIENER ET AL. 2012, S. 263) oder Splitting (vgl. SCHNEIDER ET AL. 2005, S. 71) bezeichnet, bei dem ein Arbeitsvorgang in mehrere Teillose zur parallelen Fertigung auf mehreren Maschinen geteilt wird. Voraussetzung für das Splitten ist die Verfügbarkeit mehrerer funktionsgleicher Maschinen, ähnlich der Ausweichressourcen (s. Abschnitt 5.3.1.3). Im Gegensatz zur Überlappung erhöht sich beim Splitten neben dem Transportaufwand auch der Rüstaufwand, da jede parallele Maschine gerüstet werden muss. Somit ist das Splitten ausschließlich bei Aufträgen sinnvoll, deren Bearbeitungszeit die Rüstzeit um ein Vielfaches übersteigt oder deren Verzugskosten wesentlich höher ausfallen als der Rüstaufwand. Die Entscheidung über das Splitten sowie den Verteilungsfaktor ist in hohem Maße von der jeweiligen Situation und einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig, sodass das Splitten nicht weiter verfolgt wird, da im betrachteten System zur Sicherung einer schnellen Reaktionsfähigkeit ausschließlich automatisiert durchführbare Maßnahmen berücksichtigt werden.

### 5.3.2 Maßnahmenkaskaden

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Maßnahmen werden in Abhängigkeit der Störungsklasse auf den reparierten Ablaufplan  $P_{Rep}$  angewendet. Zur zielgerichteten Anwendung der Maßnahmen dienen die im Folgenden beschriebenen Maßnahmenkaskaden (MK) als Rahmenwerke, die den jeweiligen Störungsklassen zugeordnet sind. Nach jeder Maßnahme ist zu überprüfen, ob durch



deren Anwendung eine signifikante Verbesserung des Zielwerts bei dem nun modifizierten Ablaufplan  $P_{Mod}$  erreicht wurde. Sofern sich der Zielwert weiter verschlechtert, ist das Ergebnis zu verwerfen und mit dem vorigen Plan fortzufahren. Ist eine Verbesserung erreicht worden, wird hingegen  $P_{Mod}$  als Basis für weitere Maßnahmen verwendet. Der Durchlauf der Maßnahmenkaskaden wird abgebrochen, sofern die prozentuale Verbesserung im Vergleich zum reparierten Ablaufplan einen Schwellwert überschreitet, andernfalls wird die jeweils nächste Maßnahme in der Maßnahmenkaskade angewendet. Der Schwellwert zur Akzeptanz eines Ablaufplans wird im Folgenden als Akzeptanztoleranz  $TOL_A$  bezeichnet. Es gilt somit für die Akzeptanz folgender Zusammenhang:

$$\frac{K_{ges}(P_{Mod}) - K_{ges}(P_{Rep})}{K_{ges}(P_{Rep})} \geq TOL_A \quad (5.3)$$

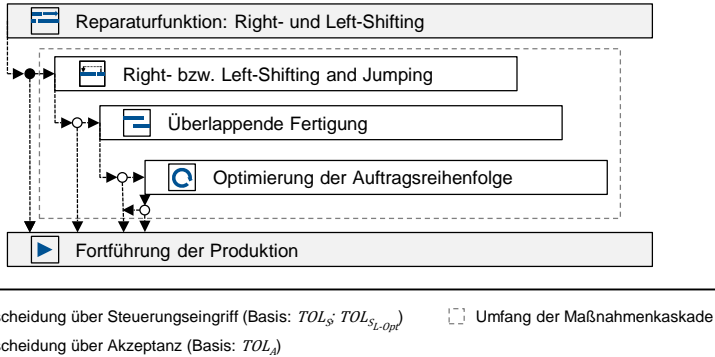
Dabei ist  $TOL_A$  kleiner oder gleich  $TOL_S$  zu wählen, da das Erreichen des Zielfunktionswertes vor der Störung als maßgebliches Ziel der Steuerung gilt und nicht dessen Verbesserung über den ursprünglichen Wert hinaus. Zudem ist anzunehmen, dass insbesondere bei schweren Störungen der ursprüngliche Wert durch keine Maßnahme mehr zu erreichen ist und somit jede Verbesserung gegenüber einer ausschließlichen Wiederherstellung der Gültigkeit vorzuziehen ist. Nach Beendigung der Steuerungsmaßnahmen wird daher auch bei Nicht-Überschreiten der Toleranzschwelle der beste ermittelte Ablaufplan als Grundlage gewählt. Für jede Maßnahme werden ausschließlich Arbeitsvorgänge betrachtet, deren Bearbeitung noch nicht begonnen wurde.

### 5.3.2.1 Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs (MK I)

Bei zeitlichen Abweichungen zwischen dem Ist- und Plan-Verlauf ist zur Vermeidung von Planungsnervosität zunächst eine weitgehende Beibehaltung der Auftragsreihenfolge wünschenswert. Aus diesem Grund sind bestehende Lücken im reparierten Ablaufplan  $P_{Rep}$  auszunutzen, indem *Right-Shifting and Jumping* angewendet wird. Sofern sich der Zielwert dadurch nicht verbessert oder noch nicht in einen akzeptablen Bereich gelangt, ist im Anschluss die *überlappende Fertigung* anzuwenden, die aufgrund des damit verbundenem erhöhtem Transportaufwandes dem *Right-Shifting and Jumping* nachgelagert ist. Wenn mit keiner dieser Maßnahmen eine deutliche Verbesserung des Zielwerts erreicht werden kann und keine Überbeanspruchung einer Kapazität vorliegt, ist die *Optimierung der Auftragsreihenfolge* anzustoßen. Die vollständige Maßnahmenkaskade ist in Abb. 5.12 dargestellt.

### 5.3.2.2 Temporäre Reduzierung des Kapazitätsangebots (MK II)

Im Falle einer Maschinenstörung sind zunächst Maßnahmen einzuleiten, um die tatsächliche Störung zu beheben (z. B. Reparaturauftrag für eine Maschine).



**Abb. 5.12:** Maßnahmenkaskade bei Abweichung des zeitlichen Ist- und Plan-Verlaufs (MK I)

Aus Sicht der Produktionssteuerung ist das betroffene Arbeitssystem hingegen temporär nicht verfügbar, weswegen zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, die den weiteren Produktionsverlauf sowie den Fertigungsfluss sichern und eine termingerechte Fertigstellung der Aufträge weitgehend ermöglichen.

Bei Maschinenstörungen kurzer Dauer sind zunächst geringe Planänderungen anzustreben, um die Planungsnerosität gering zu halten. Aus diesem Grund wird auch hier versucht, über *Right-Shifting and Jumping* aufgetretene Lücken im Ablaufplan durch das Überspringen von Arbeitsvorgängen zu nutzen. Wenn diese Maßnahme keinen ausreichenden Erfolg bringt, z. B. weil die Maschine über einen längeren Zeitraum gestört ist und die dort eingeplanten Aufträge dringend fertigzustellen sind, ist das *Ausweichen auf Alternativressourcen* zu prüfen. Neben der Gewährleistung der weiteren Bearbeitung betroffener Aufträge ermöglicht diese Maßnahme auch die Reduzierung der Belastung der betroffenen Maschine. Dies ist notwendig, da die sonst verbleibenden Aufträge nach Ende der Störung in einem viel geringeren Zeitfenster als vor der Störung bearbeitet werden müssten und somit die Auslastung der Maschine über 100 % ansteigen kann. Der gleiche Effekt wird durch das *Ausweichen auf Alternativarbeitspläne* erzielt. Diese Maßnahme ist aufgrund der meist größeren Änderungen dem Ausweichen auf Alternativressourcen in der Maßnahmenkaskade nachgelagert. Sofern die belastungsreduzierenden Maßnahmen keinen Erfolg bringen, verspäten sich die betroffenen Aufträge. Daher ist, wie bei der Abweichung zwischen dem zeitlichem Ist- und Plan-Verlauf, die *überlappende Fertigung* anzuwenden, um die Auswirkungen der Verspätungen zu verringern. Sollten keine dieser Maßnahmen erfolgreich sein, ist auch hier die *Optimierung der Auftragsreihenfolge* anzustoßen. Die vollständige Maßnahmenkaskade ist in Abb. 5.13 dargestellt.

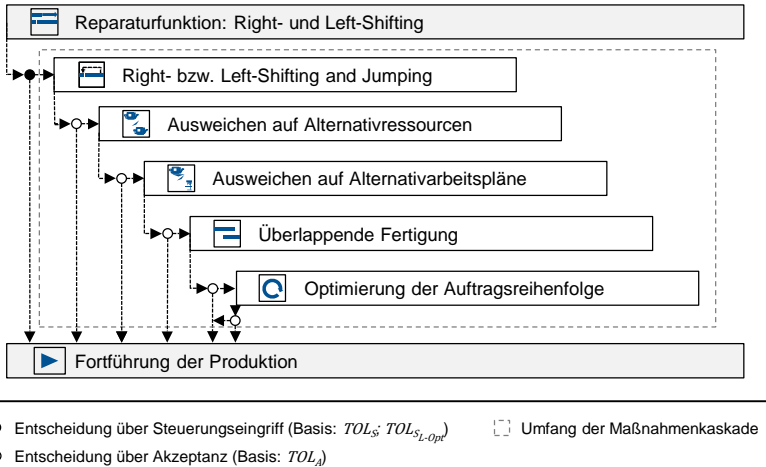


Abb. 5.13: Maßnahmenkaskade bei temporärer Reduzierung des Kapazitätsangebots (MK II)

### 5.3.2.3 Erhöhung der Kapazitätsnachfrage (MK III)

Die Einplanung eines neuen Auftrags oder neuer Arbeitsvorgänge in einen bestehenden Ablaufplan wirkt sich durch zeitlichen Verzug aller Arbeitsvorgänge aus, deren Priorität niedriger als die der neu eingeplanten Arbeitsvorgänge ist. Ausgenommen davon sind Fälle, in denen genügend große Leerzeiten auf den Maschinen verfügbar sind, um die erhöhte Kapazitätsnachfrage abzufangen (z. B. aufgrund eines gleichzeitig stornierten Auftrags). In beiden Fällen wird die ursprüngliche Reihenfolge verändert, so dass der zugrundeliegende Ablaufplan ungültig wird. Aus diesem Grund ist direkt eine *Optimierung der Auftragsreihenfolge* anzustoßen, um dadurch sowohl die Terminziele der bestehenden Aufträge als auch die der neu eingeplanten Aufträge zu berücksichtigen und somit die bestmögliche Auftragsreihenfolge auszuwählen.

Falls durch die Erhöhung der Kapazitätsnachfrage die Auslastung  $\Upsilon$  an einer oder mehreren Maschinen 100 % oder höher beträgt, ist zuvor eine Reduzierung der Belastung der betroffenen Maschinen sinnvoll. Hierzu werden analog zur Reaktion auf die Reduzierung des Kapazitätsangebots zunächst das *Ausweichen auf Alternativressourcen* und im Anschluss das *Ausweichen auf Alternativarbeitspläne* angewendet. Im Anschluss erfolgt dann die *Optimierung der Auftragsreihenfolge*. Somit existieren innerhalb der Maßnahmenkaskade für die *Erhöhung der Kapazitätsnachfrage* zwei unterschiedliche Verläufe in Abhängigkeit der Maschinenauslastung. Die vollständige Maßnahmenkaskade ist in Abb. 5.14 dargestellt.

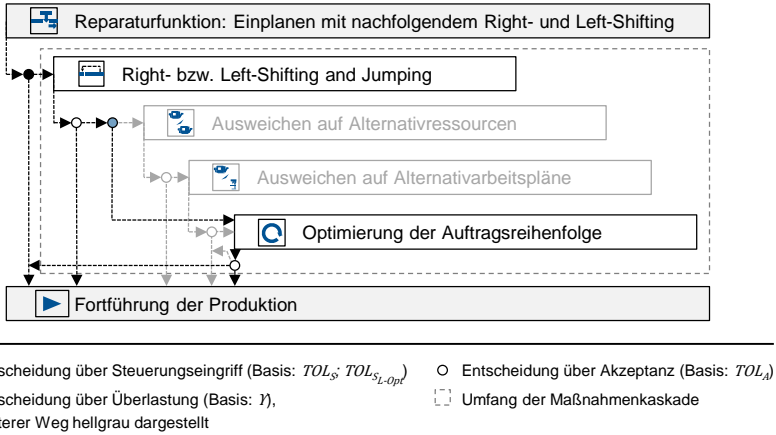


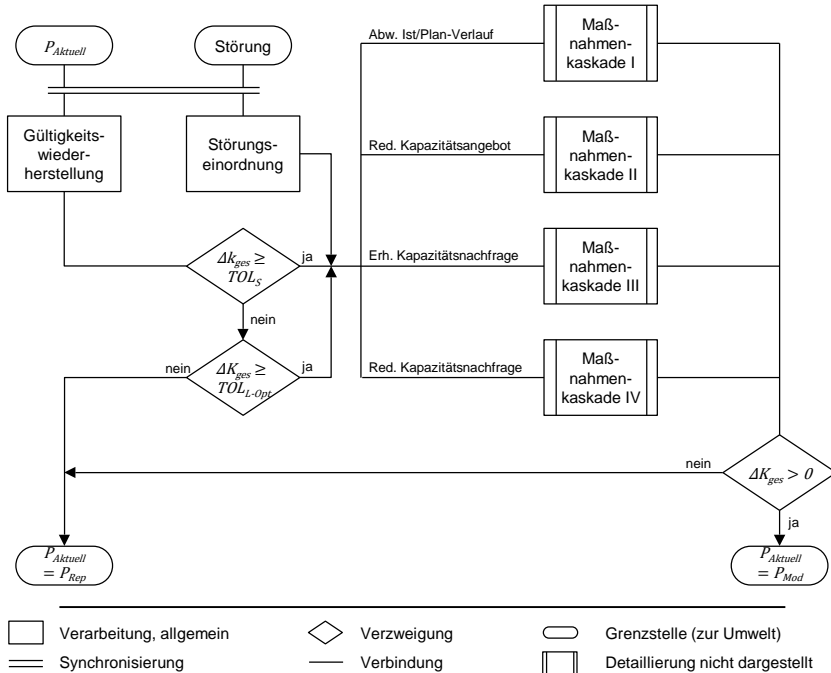
Abb. 5.14: Maßnahmenkaskade bei Erhöhung der Kapazitätsnachfrage (MK III)

### 5.3.2.4 Reduzierung der Kapazitätsnachfrage (MK IV)

Bei einer Reduzierung der Kapazitätsnachfrage fallen an den betroffenen Ressourcen freie Kapazitäten an. Im Gegensatz zu den anderen Störungsklassen ist hier keine Verschlechterung der Zielfunktion zu erwarten, da zusätzliche Nichtnutzungskosten durch den Wegfall der entsprechenden Fertigungskosten mindestens kompensiert werden. Da zudem durch den Wegfall der kapazitätsnachfragenden Einheit auch entsprechende Erlöse wegfallen können und sich somit die Wirtschaftlichkeit insgesamt reduziert, erfordert diese Störungsklasse die Einleitung von Maßnahmen zur Erschließung möglicher Optimierungspotenziale. Der durch Left-Shifting reparierte Ablaufplan  $P_{Rep}$ <sup>50</sup> wird zunächst auf die Möglichkeit des Ausnutzens bestehender Lücken im Ablaufplan durch *Left-Shifting and Jumping* überprüft und die Maßnahmen bei Verbesserung des Zielfunktionswertes beibehalten. Im Anschluss ist zudem noch eine *Optimierung der Auftragsreihenfolge* anzustoßen, deren Ergebnis hingegen nur bei einer signifikanten Verbesserung zu übernehmen ist, um die Planungsnervosität nicht unnötig zu erhöhen. Die vollständige Maßnahmenkaskade für die Reduzierung der Kapazitätsnachfrage ist in Abb. 5.15 dargestellt.

<sup>50</sup> Im eigentlichen Sinn wird der Ablaufplan in dieser Störungsklasse nicht repariert, da der ursprüngliche Plan durch den Wegfall eines oder mehrerer Arbeitsvorgänge nicht ungültig wird. Zur Wahrung durchgängiger Bezeichnungen wird an dieser Stelle der Begriff *reparierter Ablaufplan* beibehalten.





**Abb. 5.16:** Gesamtablauf des Störungsmanagements (Darstellung nach DIN 66001 1983)

Wenn die Anwendung der in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmenkaskaden auf den reparierten Ablaufplan keine akzeptable Verbesserung des Zielfunktionswertes erbringt, erfolgt im Anschluss die Optimierung der gesamten Auftragsreihenfolge. Der dazu erforderliche Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung wird im folgenden Kapitel detailliert beschrieben.

## 6 Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung

### 6.1 Allgemeines

Mit den Maßnahmenkaskaden im Störungsmanagement kann nur ein geringer Teil des Lösungsraums im Rahmen der Reihenfolgebildung erreicht werden, sodass in Fällen, in denen sich der Zielfunktionswert nicht maßnahmenbedingt verbessern lässt, eine weitreichende Durchsuchung des Lösungsraums erforderlich ist.

Dies wird durch einen Algorithmus ermöglicht, der in sehr kurzer Zeit auch große JSSP mit praktischen Randbedingungen möglichst optimal löst (vgl. Abb. 4.3). Als Zielfunktion wird die Minimierung der reihenfolgeabhängigen Kosten  $K_{red}$ <sup>51</sup> (vgl. Abschnitt 4.3.3) herangezogen:

$$\min K_{red}$$

Aufgrund der Vielzahl an Abhängigkeiten innerhalb eines Maschinenbelegungsplans ist es insbesondere bei umfangreichen Plänen nicht möglich, analytisch die Arbeitsvorgänge auszuwählen, bei denen eine Reihenfolgeänderung die größtmögliche Verbesserung des Zielfunktionswerts bewirkt. Stattdessen wird, aufbauend auf dem Stand der Technik (Abschnitt 2.2), das Prinzip der Nachbarschaftssuche genutzt, um iterativ den Lösungsraum zu durchsuchen. Da mit  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  stets eine gültige Ausgangslösung vorliegt, ist kein Eröffnungsverfahren notwendig. Der Lösungsalgorithmus, dessen Ablauf in Abb. 6.1 dargestellt ist, lässt sich strukturell in die Klasse der Evolutionären Algorithmen einordnen und besteht im Kern aus einer Population *pop*, die eine bestimmte Menge an Chromosomen umfasst. Jedes Chromosom  $c$  entspricht der Lösung  $s$  in Form der im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Repräsentationsvorschrift. Diese wird durch Kodierung erzeugt und durch Dekodierung für die Bewertung in einen gültigen Ablaufplan überführt (Abschnitt 6.2). Im Rahmen der Lösungssuche werden mit jeder Generation *gen* aus den Chromosomen durch Mutation (Abschnitt 6.3.1) neue Lösungen  $s$  erzeugt. Sofern diese eine Verbesserung oder minimale Verschlechterung vorweisen, erfolgt im Anschluss

---

<sup>51</sup> Alternativ kann auch die Funktion  $K_{ges}$  herangezogen werden, die dort zusätzlich enthaltenen Kostenelemente Fertigungs- und Transportkosten werden durch den Algorithmus nicht verändert, erhöhen aber den Rechenaufwand, sodass dies nicht zu empfehlen ist.





## 6.2 Repräsentation des Ablaufplans

Die Anwendung von Operatoren zur Erzeugung neuer Reihenfolgen (vgl. Ausführungen zum Sequencing in Abschnitt 2.2.1.2 auf S. 32) erfordert eine Repräsentation des Ablaufplans in einer Form, die eine einfache Überarbeitung bzw. Mutation der Ausgangslösung erlaubt. Während die symbolische Repräsentation (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) keine technologischen Reihenfolgen berücksichtigt, ist den Task-Sequenzen sowie der Permutation mit Wiederholung nur nach erfolgtem Scheduling die Auftragsfolge der Maschinen zu entnehmen. Daher wird eine neue Repräsentationsform für die Abbildung der Auftragsreihenfolge entwickelt, die gleichzeitig die Maschinenfolge der Aufträge als auch die Auftragsfolge der Maschinen in Form einer Matrix darstellt. Dies ermöglicht die getrennte Berechnung von auftragsfolgeabhängigen Kostenbestandteilen (z. B. Rüstkosten) als auch auftragsabhängigen Kostenbestandteilen (z. B. Fertigungskosten), bevor nach dem Scheduling die ablaufplanabhängigen Kosten (z. B. Verzugskosten) ermittelt werden. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Anwendung universell formulierter Operatoren auf eine solche Matrix. Zudem sollen durch das neue Repräsentationsschema Unstetigkeiten<sup>52</sup> im Suchraum vermieden werden (BIERWIRTH ET AL. 1993).

### 6.2.1 Variablendefinition

Innerhalb eines Steuerungszeitfensters besteht die Auftragsreihenfolge in Anlehnung an die Notation des JSSP (vgl. Abschnitt 2.2.1.1 auf S. 31) aus einer Anzahl Aufträge  $J_1$  bis  $J_n$  sowie einer Menge von Maschinen bzw. Arbeitsstationen  $M_1$  bis  $M_m$ . Jeder Auftrag  $i$  besteht aus einer Menge von  $n_i$  Arbeitsvorgängen  $O_{i,j}$  mit  $j \in \{1, \dots, n_i\}$ . Jedem Arbeitsvorgang  $O_{i,j}$  ist ein Startzeitpunkt der Bearbeitung  $TVB_{i,j}$  zugeordnet. Bezogen auf den Ablaufplan lässt sich jedem Bearbeitungsbeginn  $TVB_{i,j}$  von  $O_{i,j}$  eine Position  $b_{i,j} \in \{1, \dots, AzO\}$  in der globalen Reihenfolge zuordnen, die Ausgangsbasis für die Repräsentation der Auftragsreihenfolge ist.

### 6.2.2 Auftragsreihenfolgematrix

Gemäß Annahme AN 7, dass nur wenige Rückflüsse im Materialfluss existieren, ist die im Folgenden als Auftragsreihenfolgematrix (ARF) bezeichnete Matrix so gestaltet, dass ein Auftrag jede Maschine maximal einmal durchläuft. Der

<sup>52</sup> Unstetigkeiten, in der Informatik auch als „Hemming-Cliffs“ bezeichnet, treten auf, wenn nebeneinanderliegende Lösungen nicht durch die Repräsentation ausgedrückt werden können. Ist z.B. die Zahl 7 im Binärcode als 0111 codiert, erfordert die Änderung zur Zahl 8 (binär: 1000) die Änderung von allen vier Bits (vgl. auch SPRAVE 1999).

Umgang mit existierenden Rückflüssen im Materialfluss wird später in Abschnitt 6.4 beschrieben. Somit kann eine Operation  $O_{i,j}$  auch in Abhängigkeit des Auftragsindex  $i$  und des Maschinenindex  $k$  als  $O_{i,k}$  dargestellt werden. Selbiges gilt auch für die Startzeitpunkte der jeweiligen Arbeitsvorgänge  $TVB_{i,j}$  und deren Position in der globalen Reihenfolge  $b_{i,j}$ , die somit im Folgenden als  $TVB_{i,k}$  und  $b_{i,k}$  zu interpretieren sind.

Die ARF-Matrix enthält die globale Auftragsreihenfolge in Form der Positionen aller Startzeitpunkte der Arbeitsvorgänge:

$$ARF = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m,1} & b_{m,2} & \cdots & b_{m,n} \end{pmatrix} \tag{6.1}$$

Die Erstellung der ARF-Matrix aus einem Ablaufplan wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 6.2.3 Generierung einer Ausgangslösung (Kodierung)

Die Erstellung einer Ausgangslösung erfolgt durch die Bestimmung der Positionsnummern  $b_{i,k}$  in Abhängigkeit des Bearbeitungsbeginns  $TVB_{i,k}$  der Arbeitsvorgänge. Der Wert von  $b_{i,k}$  wird in der ARF-Matrix in das Feld mit der Spalte  $i$  und der Zeile  $k$  eingetragen. Falls zwei oder mehr Arbeitsvorgänge dasselbe Startdatum  $TVB_{i,k}$  aufweisen, sind den zugehörigen Arbeitsvorgängen aufeinanderfolgende Werte für  $b_{i,k}$  zuzuordnen, da jede Zahl nur einmal innerhalb der ARF-Matrix existieren darf. Dabei ist es unbedeutend, welchem Arbeitsvorgang welcher Wert zugeordnet wird.

Sofern eine Maschine nicht in der technologischen Folge eines Auftrags enthalten ist, wird das entsprechende Feld innerhalb der Matrix mit einem Wert außerhalb des Zahlenspektrums  $\{1, \dots, AzO\} \in \mathbb{N}$  belegt. Für das in Abb. 6.2 dargestellte Beispiel wurde eine Null verwendet, alternativ können auch natürliche Zahlen größer der Gesamtanzahl an Arbeitsvorgängen  $AzO$  verwendet werden. Die Kodierung ist abgeschlossen, wenn alle Felder der ARF-Matrix gefüllt wurden.

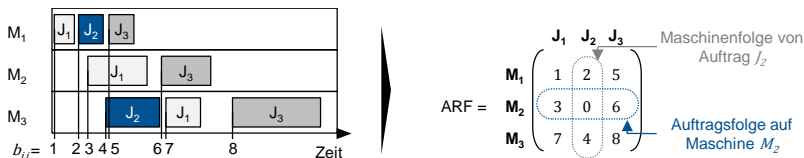


Abb. 6.2: Beispielhafte Überführung eines Ablaufplans in die ARF-Matrix

Die Kodierung des Ablaufplans als ARF-Matrix wird bei jedem Aufruf des Algorithmus durchgeführt, da die Nummerierung von  $b_{i,k}$  stets auf dem aktuell gültigen Ablaufplan  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  basiert. Innerhalb der Reihenfolgeoptimierung wird die Kodierung beibehalten, auch wenn für jede neue Lösung zur Berechnung der Zielfunktionswerte eine Dekodierung durchgeführt wird. Dieser Prozess des Scheduling ist im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

### 6.2.4 Berechnung des Ablaufplans (Scheduling)

Zur Dekodierung der ARF-Matrix einer gültigen Lösung<sup>53</sup> werden die Positionen  $b_{i,k}$  in aufsteigender Reihenfolge durchgegangen und die Zeitpunkte von Bearbeitungsbeginn  $TVB_{i,j}$  und -ende  $TVE_{i,j}$ <sup>54</sup> der zugehörigen Arbeitsvorgänge berechnet. Für die Berechnung von  $TVB_{i,j}$  sind dabei folgende Zeitpunkte relevant:

- Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorgang  $TVE_{i,j-1}$
- Früheste Verfügbarkeit von Maschine  $k$ , entspricht dem Bearbeitungsende des vorgelagerten Arbeitsvorgangs  $TVE_{k,a-1}$  auf Maschine  $k$
- Frühester Verfügbarkeitszeitpunkt aufgrund von Randbedingungen für  $TVF_{i,j}$ , wie z. B. Materialverfügbarkeit<sup>55</sup>

Der späteste dieser Zeitpunkte wird als  $TVB_{i,j}$  gesetzt. Falls dies  $TVE_{i,j-1}$  ist, wird die dazu noch entsprechende Übergangszeit  $t_{\bar{U}_{i,j}}$  (vgl. Abschnitt 4.3.2.2) addiert, um Transportzeiten zwischen den zugehörigen Arbeitssystemen zu berücksichtigen.

Der Zeitpunkt des Bearbeitungsendes  $TVE_{i,j}$  hängt von der Ausführungszeit des Arbeitsvorgangs  $t_{A_{i,j}}$  sowie gegebenenfalls der Rüstzeit  $t_{R_{k,a}}$  ab und berechnet sich wie folgt:

$$TVE_{i,j} = \begin{cases} TVB_{i,j} + t_{A_{i,j}} & \text{für } RZO_{k,a-1} \neq RZO_{k,a} \\ TVB_{i,j} + t_{R_{k,a}} + t_{A_{i,j}} & \text{für } RZO_{k,a-1} = RZO_{k,a} \end{cases} \quad (6.2)$$

<sup>53</sup> Da das Scheduling einen hohen Zeitaufwand erfordert, sind ausschließlich gültige Lösungen zu dekodieren. Bei der Erzeugung neuer Lösungen ist deren Gültigkeit sicherzustellen.

<sup>54</sup> Außerhalb der ARF-Matrix empfiehlt sich die Angabe der Arbeitsvorgänge in Abhängigkeit von Auftrag  $i$  und Arbeitsgang  $j$ , um den Bezug zwischen den Arbeitsvorgängen wiederherzustellen.

<sup>55</sup> In der Regel existieren Verfügbarkeitsrandbedingungen nur beim jeweils ersten Arbeitsvorgang eines Auftrags  $j = 1$ .

Obwohl die Reihenfolge von  $b_{i,k}$  nach erfolgter Mutation nicht zwingend der globalen Reihenfolge der Startdaten  $TVB_{i,j}$  entspricht, erfordert die Dekodierung keine weitere Abfrage, da bei einer gültigen Lösung stets die Werte  $b_{i,k}$  in aufsteigender Reihenfolge spaltenweise der technologischen Vorschrift und zeilenweise der Auftragsreihenfolge der entsprechenden Maschine entsprechen. Somit ist der Fall ausgeschlossen, dass bei der Betrachtung eines Arbeitsvorgangs  $O_{i,j}$  der Vorgänger im Auftrag  $O_{i,j-1}$  oder auf der Maschine  $O_{k,a-1}$  noch nicht eingeplant wurde.

Der terminierte Ablaufplan  $P_s$  ist die Ausgangsbasis zur Berechnung der reihenfolgeabhängigen Kosten  $K_V$ ,  $K_R$  und  $K_N$  (vgl. Abschnitt 4.3.2 auf S. 76). Bei der Ergebnisübergabe der Reihenfolgeoptimierung an die Produktionssteuerung sind  $K_T$  und  $K_F$  zu addieren, um dieselbe Basis wie das vorgelagerte Störungsmanagement zu verwenden. Dieser Schritt entfällt, wenn stattdessen  $K_{ges}$  als Zielfunktion im Algorithmus herangezogen wird (s. Fußnote 51 auf S. 113).

Der Scheduling-Algorithmus erzeugt semiaktive Produktionspläne (vgl. Abschnitt 2.2.1.3 auf S. 35), da entstehende Leerzeiten auf den Maschinen nicht durch andere, später eingeplante Arbeitsvorgänge ausgenutzt werden. Somit wird der Lösungsraum gegenüber eines Scheduling-Algorithmus zur Erzeugung aktiver Produktionspläne ausgeweitet. Aktive Produktionspläne weisen die kürzeste Gesamtdurchlaufzeit einer vorgegebenen Reihenfolge auf und werden somit im klassischen JSSP häufig eingesetzt. Die vorliegende Zielfunktion enthält dagegen eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die nicht mit der kürzesten Durchlaufzeit korrelieren, sodass die Einschränkung auf aktive Arbeitspläne nicht sinnvoll ist. Sollte dennoch die optimale Lösung ein aktiver Arbeitsplan sein, ist dieser auch durch mehrmalige Mutation der Ausgangslösung zu erreichen.

### 6.3 Operatoren

#### 6.3.1 Sequencing

Ein wichtiger Bestandteil in Nachbarschaftssuchverfahren ist die Gestaltung der Operatoren, mit denen neue Lösungen in der Nachbarschaft gesucht werden. Dieser Vorgang wird analog zum Vorgehen beim JSSP (vgl. Abschnitt 2.2.1.2 auf S. 32) als *Sequencing* bezeichnet. Dabei ist auch im Rahmen der Reihenfolgeoptimierung möglichst eine Lösung zu suchen, deren Reihenfolge sich nicht zu stark von derer in der Ausgangslösung unterscheidet, um die Planungsnervosität in der Fertigung nicht unnötig zu erhöhen. Die Einschränkungen bei der Durchsuchung des Lösungsraums sollten dennoch nicht zu hoch ausfallen, um eine vollständige Durchsuchung des Lösungsraums nicht auszuschließen.

Im Hinblick auf kurze Rechenzeiten ist das Sequencing zudem so zu gestalten, dass Lösungen, die mit großer Wahrscheinlichkeit schlechter sind, vermieden werden. Grundsätzlich kann angenommen werden, dass der Ablaufplan vor Eintreten der Störung optimal oder zumindest hinreichend gut war. Eine Störung kann sich zwar auf den weiteren Fertigungsverlauf ausweiten, dennoch werden große Teile des Ablaufplans nicht oder nur geringfügig verändert. Somit ist zu erwarten, dass gute Lösungen eher im Lösungsraum nahe  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  zu finden sind.

### 6.3.1.1 Mutation

Der Schwerpunkt des Suchprozesses liegt auf dem Lösungsraum nahe der Ausgangslösung, der über kleine Änderungen im Ablaufplan modifiziert wird. Eingebettet in einen Evolutionären Algorithmus können iterativ auch Lösungen erreicht werden, die sich stark von  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  unterscheiden. Durch wiederholtes Sequencing wird somit schrittweise ein großer Lösungsraum durchsucht.

Eine neue Lösung wird durch das Vertauschen zweier Werte von  $b_{i,k} \in \{1, \dots, AzO\}$  in der ARF-Matrix erstellt (s. Abb. 6.3). Sofern sich dadurch die resultierende Auftragsfolge einer Maschine ändert, entsteht durch anschließendes Scheduling ein Ablaufplan  $P_s$ , der sich von der Ausgangslösung unterscheidet. Das Vertauschen zweier Elemente wird in Anlehnung an die Notation der Evolutionären Algorithmen (vgl. Ausführungen auf S. 41) als *Mutation* bezeichnet.

$$\text{ARF} = \begin{array}{c} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{M}_3 \end{array} \begin{array}{ccc} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_3 \\ \left( \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 5 \\ 3 & 0 & 6 \\ 7 & 4 & 8 \end{array} \right) \end{array} \quad \blacktriangleright \quad \begin{array}{c} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{M}_3 \end{array} \begin{array}{ccc} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_3 \\ \left( \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ 5 & 0 & 6 \\ 7 & 4 & 8 \end{array} \right) \end{array}$$

Abb. 6.3: Beispiel für eine Mutation der Werte  $b_{1,2} = 3$  und  $b_{3,1} = 5$ .

### 6.3.1.2 Reparaturfunktion

Das Vertauschen zweier Elemente kann eine Änderung der Maschinenfolge eines Auftrags bewirken. Da die Maschinenfolge durch den Arbeitsplan fest vorgegeben ist, ist eine solche Lösung unzulässig. Aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit, durch Vertauschen ungültige Lösungen zu erzeugen (vgl. auch Ausführungen in Anhang B.1) würde ein Wegfall ungültiger Lösungen zu einer Reduzierung der Gesamtpopulation führen, ein wiederholtes Mutieren würde nur mit geringer Wahrscheinlichkeit bessere Lösungen erzeugen. Aus diesem Grund ist ein Reparaturverfahren notwendig, mit dem eine unzulässige in eine zulässige Lösung überführt werden kann.

Durch die zeilenweise aufsteigende Sortierung von  $b_{i,k}$  lässt sich aus den zugehörigen Aufträgen  $i$  die Auftragsfolge von Maschine  $k$  ableiten. Gleichzeitig lässt sich aus einer spaltenweise aufsteigenden Sortierung von  $b_{i,k}$  die Maschinenfolge von Auftrag  $i$  ableiten (vgl. auch Abb. 6.2). Da die Maschinenfolge aus der technologischen Vorschrift resultiert und bei der Optimierung der Auftragsfolge nicht geändert wird, ist die Lösung einer ARF-Matrix nur gültig, wenn die Maschinenfolge einer jeden Spalte der technologischen Vorschrift des zugehörigen Auftrags entspricht. Aus jeder ARF-Matrix lässt sich durch die Repräsentationsform eine Prüfmatrix ableiten, die Prüfmatrix  $PR_{ARF}$  ableiten. Diese enthält spaltenweise die Maschinenfolge der Aufträge in aufeinanderfolgenden natürlichen Zahlen, wie folgendes Beispiel zeigt:

$$ARF = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix} \qquad PR_{ARF} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Durch den Abgleich der Prüfmatrix mit einer zweiten Prüfmatrix einer gültigen Lösung (z. B. abgeleitet aus der Ausgangslösung  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$ ) kann einfach festgestellt werden, ob die Reihenfolge der zugehörigen Lösung gültig ist oder nicht. Zugleich kann die Verletzung der technologischen Reihenfolge lokalisiert und zielgerichtet deren Gültigkeit wiederhergestellt werden. Am Beispiel untenstehender ARF-Matrix wird durch Mutation eine Vertauschung der Werte 6 und 9 bewirkt.

$$ARF = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{wird zu} \quad ARF' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 9 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

$$PR_{ARF} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad \text{wird zu} \quad PR_{ARF'} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$PR_{ARF}$  stimmt nicht mit  $PR_{ARF'}$  überein, sodass  $ARF'$  eine unzulässige Lösung darstellt. Ein Vergleich der Prüfmatrix gibt Aufschluss über die Stelle, an der eine Reparatur notwendig ist, im Beispiel sind dies die Werte 2 und 3 in  $PR_{ARF'}$  bzw. die entsprechenden Werte 6 und 7 in  $ARF'$ . Mit Hilfe der Reparaturfunktion wird die gestörte Stelle somit ermittelt und durch Vertauschen der Elemente in  $ARF'$  eine gültige Lösung  $ARF''$  erzeugt:

$$ARF' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 9 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{wird zu} \quad ARF'' = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 9 \\ 5 & 6 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

$$PR_{ARF'} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad \text{wird zu} \quad PR_{ARF''} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$PR_{ARF}$  und  $PR_{ARF''}$  sind identisch, entsprechend ist  $ARF''$  eine gültige mutierte Lösung.

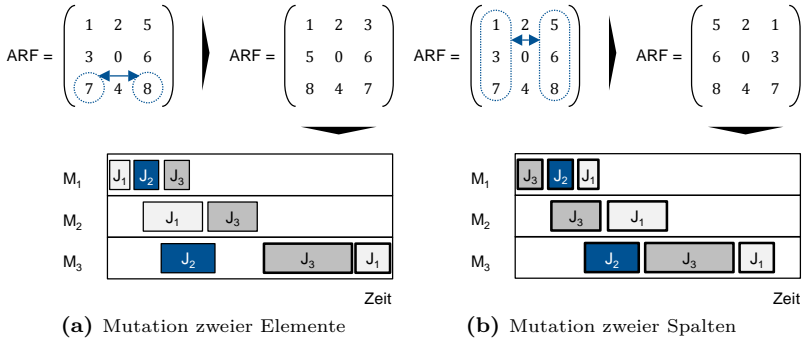
Durch die Reparaturfunktion kann jede durch Mutation erzeugte Lösung verwendet werden. Durch die Reparatur mutiert die ARF-Matrix hingegen ein weiteres Mal, sodass mit steigendem Reparaturaufwand eine zunehmende Beeinflussung der Maschinenfolgen entsteht. Nach erfolgter Reparatur ist nicht mehr gewährleistet, dass die Änderung durch Mutation im Ablaufplan an der Stelle stattfindet, an der die initiale Vertauschung erfolgte (vgl. Beispiel B.2 in Anhang B). Da aufgrund der Vielzahl an Zusammenhängen keine analytische Auswirkung auf die Kostenfunktion zu ermitteln ist, stellt dieses Phänomen keine Beeinträchtigung der Lösungssuche da. Die Auswahl der zu mutierenden Stellen erfolgt zufällig. Um eine gezielte Nachbarschaftssuche gewährleisten zu können, ist die Abschätzung der Distanz von Bedeutung, mit der sich ein neues Individuum von der Ausgangslösung entfernt. Dieser Aspekt wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

### 6.3.1.3 Entfernung innerhalb der Nachbarschaft

Durch die Differenz zweier zu tauschender Werte wird der Grad beeinflusst, in dem sich eine Lösung durch die Mutation verändert (s. Beispiel in Anhang B.3). Darüber hinaus kann durch das gleichzeitige Tauschen mehrerer Elemente eine stärkere Veränderung der Lösung herbeigeführt werden. Die Mutation ganzer Spalten ändert die Reihenfolge jeder Zeile, sodass durch einen Tausch auf jeder Maschine eine Reihenfolgeänderung induziert wird. Dabei ist zu beachten, dass Werte außerhalb des Zahlenspektrums  $\{1, \dots, AzO\}$  nicht mutiert werden. Sofern Annahme AN 3 einer weitgehend linearen Technologiefolge zutrifft, erfordert eine spaltenweise Mutation keine oder nur geringe Reparaturmaßnahmen, sodass dieser Tausch der globalen Umpriorisierung zweier Aufträge entspricht. Somit werden im Rahmen des vorgestellten Algorithmus zwei Mutationsarten gewählt (s. Abb. 6.4):

- Mutation zweier Elemente zur lokalen Nachbarschaftssuche
- Mutation zweier Spalten zur globalen Nachbarschaftssuche

Eine Rekombination, wie sie in Genetischen Algorithmen (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) zur Erschließung neuer Lösungsräume verwendet wird und durch NIEHUES ET AL. (vgl. 2015) diskutiert wurde, ist nicht zielführend. Zum einen erfordert die Kombination zweier Matrizen ein weiteres Reparaturverfahren, mit denen doppelt vorhandene Werte ermittelt und korrigiert werden, da jeder Wert in der ARF-Matrix nur einmal vorkommen darf. Zum anderen wird durch die Vielzahl an Reparatur- und Tauschvorgängen der ursprünglichen Motivation



**Abb. 6.4:** Mutationsarten zur Nachbarschaftssuche und deren Auswirkungen auf den Ablaufplan (Reihenfolgeänderung der jeweils markierten Arbeitsvorgänge)

der Rekombination als Zusammenfügen zweier guter Lösungen<sup>56</sup> die Grundlage entzogen. Aus diesem Grund wird auf die Rekombination verzichtet und ausschließlich über Mutation neue Lösungen erzeugt.

### 6.3.1.4 Erzeugung einer Startpopulation

Neben dem grundsätzlichen Einsatz zur Erzeugung neuer Lösungen kommt der Mutation auch eine wichtige Funktion bei der Erzeugung der Startpopulation zu. Ausgehend von der Ausgangslösung  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  sind durch Mutation so viele Lösungen zu erzeugen, wie Individuen in der Population enthalten sind, abzüglich einer Lösung, die durch die Ausgangslösung besetzt wird. Diese bilden die Startpopulation und somit die Basis für weitere Optimierungen.

### 6.3.1.5 Evolutionsstrategie und Vorselektion

Im Rahmen der Evolution wird die Mutation in Kombination mit der nachgelagerten Reparaturfunktion als Sequencing-Operator für die Erzeugung neuer Lösungen herangezogen. Aus jeder Ausgangslösung  $s$  der Population werden eine vordefinierte Anzahl von Nachkommen erzeugt, die zur Auswahl der Individuen für die Folgegeneration zur Verfügung stehen. Um zu verhindern, dass wesentlich schlechtere Lösungen in die Folgegeneration gelangen, wird in Anlehnung an die Methode des Threshold-Accepting-Algorithmus (TA) eine Vorselektion durchgeführt, bei dem ausschließlich Lösungen in die Auswahl gelangen, deren Zielwert einen bestimmten Akzeptanzschwellwert  $TOL_{Akz}$

<sup>56</sup> Vgl. hierzu u. a. ZÄPFEL & BRAUNE (2005, S. 45, hier als Kreuzung bezeichnet) sowie WEICKER (2015, S. 15).



nicht überschreiten. Mit steigender Anzahl Generationen wird der Schwellwert angehoben, um auf diese Weise durch die sinkende Akzeptanz schlechter Lösungen eine Konvergenz des Algorithmus zu erzeugen.

$$K_{red}(ARF_{gen,s}) - K_{red}(ARF_{gen-1,s}) < TOL_{Akz} \quad (6.3)$$

### 6.3.2 Fitnessfunktion

Der Begriff Fitness steht insbesondere im Umfeld Evolutionärer Algorithmen für die „Güte einer durch ein Chromosom kodierten Lösung“ (GERDES ET AL. 2004, S. 34) und dient als Hilfsmittel für die Selektion der Lösungen (WEICKER 2015, S. 15). Die Fitnessfunktion  $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $s \mapsto f(s)$  weist jeder Lösung  $s$  der Lösungsmenge  $S$  einen Gütewert zu (WEICKER 2015, S. 20). Dabei leitet sich die Fitnessfunktion aus den Zielgrößen der Optimierung ab, in dieser Arbeit die Zielfunktion zur Kostenbewertung  $K_{red}$  (bzw.  $K_{ges}$ ).

Gute Lösungen sind Lösungen, die geringe reihenfolgeabhängige Kosten enthalten. Solchen Lösungen ist ein hoher Fitnesswert zuzuteilen, um deren Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, in die Population der Folgegeneration aufgenommen zu werden. Die Berechnung der Fitness erfolgt dabei für jede Lösung  $s$  einer Generation  $gen$ . Nach erfolgtem Scheduling der zugehörigen ARF-Matrix  $ARF_{gen,s}$  wird deren Lösungswert  $K_{red}(ARF_{gen,s})$  zum besten Lösungswert der Vorgängergeneration  $K_{red}(ARF_{gen-1,s_{opt}})$  ins Verhältnis gesetzt. Zudem erfolgt eine Multiplikation mit der Konstanten  $\delta$ , addiert durch die mit dem Faktor  $\epsilon$  multiplizierten Anzahl Generationen  $gen$ . Auf diese Weise kann eine Gewichtung des Fitnesswertes erfolgen, zudem wird durch den Faktor  $\epsilon$  der Selektionsdruck mit zunehmender Iteration erhöht.

$$f_{ges}(ARF_{gen,s}) = \frac{K_{red}(ARF_{gen-1,s_{opt}})}{K_{red}(ARF_{gen,s})} \cdot [\delta + \epsilon \cdot gen] \quad (6.4)$$

Innerhalb der Kostenfunktion kann es möglich, dass in einzelnen Kostenkomponenten nur schwer Verbesserungen möglich sind. So ist es z. B. bei stark ausgelasteten Maschinen denkbar, dass nur mit sehr wenigen Reihenfolgekombinationen eine Lösung zu finden ist, bei der alle Aufträge pünktlich fertiggestellt werden. Sofern solche Zusammenhänge für die zugrundeliegende Werkstattfertigung bekannt sind, können diese bei der Berechnung der Fitness berücksichtigt werden. Ziel ist es, auch Lösungen in die Folgegeneration zu übernehmen, die im entsprechenden Kostenbestandteil besonders gute Ergebnisse erzielen, um diese als Basis für weitere Verbesserungen heranzuziehen. Da diese Lösungen nur für die Erhöhung der Übernahmewahrscheinlichkeit, nicht jedoch für die Bestimmung der optimalen Lösung herangezogen werden, wird das Ziel einer Steuerung nach existierenden reihenfolgeabhängigen Kosten nicht verletzt. Die

gewichtete Betrachtung der reihenfolgeabhängigen Kosten wird durch eine weitere Fitnessfunktion  $f_{spez}$  vorgenommen:

$$f_{spez}(ARF_{gen,s}) = \frac{K_{gew}(ARF_{gen-1,s_{opt}})}{K_{gew}(ARF_{gen,s})} \cdot [\delta + \epsilon \cdot gen] \quad (6.5)$$

mit  $K_{gew} = K_V \cdot g_V + K_R \cdot g_R + K_N \cdot g_N$  und  $g_V + g_R + g_N = 1$

Einen hohen Fitnesswert  $f_{ges}$  weisen Lösungen mit generell niedrigen reihenfolgeabhängigen Kosten  $K_{red}$  auf. Dagegen schützt ein hoher Fitnesswert  $f_{spez}$  Lösungen, in denen vorbestimmte Kostenfaktoren besonders niedrig ausfallen. Durch die Berücksichtigung beider Fitnesswerte werden somit auch Lösungen übernommen, die zwar keine besonders niedrigen Gesamtkosten aufweisen aber Potenzial für die Entwicklung weiterer Lösungen bieten.

### 6.3.3 Selektion

Über die Selektion wird festgelegt, welche erzeugten Lösungen  $s$  einer Generation  $gen$  in die Folgegeneration in Form der Population übernommen werden. Die Auswahl erfolgt in der Regel heuristisch, z. B. durch die Rouletterad-Selektion (vgl. GERDES ET AL. 2004, S. 39), bei der anhand zufälliger Ziehungen die Lösungen nach ihrer Übernahmewahrscheinlichkeit  $\omega$  in die Population  $pop$  übernommen werden<sup>57</sup>. Die Übernahmewahrscheinlichkeit  $\omega_s$  hängt von der Fitness einer Lösung  $s$  im Vergleich zur Summe aller Fitnesswerte der Lösungsmenge  $S$  ab. Die Lösungsmenge  $S$  setzt sich aus allen erzeugten Lösungen  $s$ , deren Differenz zum Zielwert der ursprünglichen Lösung die Akzeptanzgrenze  $TOL_{Akz}$  nicht unterschreitet sowie den jeweils besten Lösungen der Elterngeneration zusammen, die ungehindert in die Selektion gelangen. Sofern ausnahmslos alle neu erzeugten Lösungen einen besseren Zielfunktionswert als die Elternlösung aufweisen, kann auf die Übernahme verzichtet werden. Die Übernahme der Elterngeneration dient der Sicherung bestehender guter Lösungen, deren bedingungslose Übernahme in die Population der Folgegeneration birgt dagegen die Gefahr, dass ein lokales Optimum durch dominante Individuen nicht mehr verlassen wird (vgl. EBLENKAMP 1996, S. 85).

Die Formeln für die Übernahmewahrscheinlichkeit  $\omega_{s,ges}$  und  $\omega_{s,spez}$  lauten:

$$\omega_{s,ges} = \frac{f_{ges}(s)}{\sum_{s=1}^S f_{ges}(s)} \quad (6.6)$$

$$\omega_{s,spez} = \frac{f_{spez}(s)}{\sum_{s=1}^S f_{spez}(s)} \quad (6.7)$$

---

<sup>57</sup> Für weitere Selektionsverfahren sei auf GERDES ET AL. (2004, S. 79ff.) sowie STEININGER (2007, S. 138ff.) verwiesen.

Bei der Selektion wird die Ziehung nach den Werten  $f_{ges}$  und  $f_{spez}$  getrennt für eine fest reservierte Menge an Plätzen in der Population vorgenommen, damit ein jeweils guter Wert in  $f_{ges}$  nicht durch einen schlechten Wert in  $f_{spez}$  relativiert wird und umgekehrt. Sofern auf die Berechnung von  $f_{spez}$  verzichtet wird, erfolgt die Ziehung ausschließlich nach  $f_{ges}$ .

### 6.3.4 Abbruchkriterium

Um eine Endlosschleife des Algorithmus zu vermeiden ist ein Abbruchkriterium erforderlich, mit dem definiert ist, wann die Generationenfolge eines evolutionären Algorithmus endet (GERDES ET AL. 2004, S. 123).<sup>58</sup> Da aufgrund der Unkenntnis des erreichbaren Zielfunktionswerts kein zu erreichender Zielwert für  $K_{red}$  zu bestimmen ist, empfiehlt sich der Abbruch, wenn sich die Gesamtfitness der Population über mehrere Generationen nicht mehr ändert. Da im Rahmen der adaptiven Produktionssteuerung ein kurzes Antwortzeitverhalten erforderlich ist, ist zudem eine Obergrenze für die Rechenzeit zu setzen, nach der der Algorithmus abubrechen ist.

Nach Abbruch des Optimierungslaufs wird die bis dahin beste Lösung in Form eines terminierten Ablaufplans ausgegeben und für die Produktionssteuerung übernommen. Zudem wird das Ergebnis als neuer Wert für die Vergleichsbasis zur Initiierung von Maßnahmen  $P_{L-Opt}$  gesetzt. Sofern keine Verbesserung gefunden wurde, wird die Ausgangslösung  $P_{Rep}$  bzw.  $P_{Mod}$  an die Produktionssteuerung übergeben.

## 6.4 Randbedingungen

Die Repräsentation der Auftragsreihenfolge als ARF-Matrix erlaubt ausschließlich Aufträge, bei denen jede Maschine nur einmal durchlaufen wird (vgl. Abschnitt 6.2.2). Es ist jedoch anzunehmen, dass immer Aufträge existieren, die Rückflüsse enthalten, d. h. eine Maschine mehrfach im Arbeitsplan vorkommt (vgl. auch Annahme AN 7). Um dies zu ermöglichen ist eine zusätzliche Abfrage erforderlich, die alle Aufträge mit Rückflüssen im Materialfluss identifiziert und vor dem wiederholten Durchlauf einer Maschine aufteilt. Ein Auftrag  $J_i$  mit  $n_i$  Arbeitsvorgängen, bei dem Maschine  $M_k$  an der  $x$ -ten Stelle erneut im Arbeitsplan vorkommt, wird somit in die Aufträge  $J_{i'_1}$  mit den Arbeitsvorgängen  $O_{i'_1,1}, \dots, O_{i'_1,x-1}$  und  $J_{i'_2}$  mit den Arbeitsvorgängen  $O_{i'_2,x}, \dots, O_{i'_2,n_i}$  geteilt.

<sup>58</sup> Eine Aufzählung üblicher Abbruchkriterien findet sich bei GERDES ET AL. (2004, S. 123).

Durch die getrennte Betrachtung kann die Reihenfolge einer erzeugten Lösung die technologische Reihenfolge des Ursprungsauftrags verletzen, indem der erste Vorgang von  $J_{i'_2}$  eingeplant ist, bevor der letzte Vorgang von  $J_{i'_1}$  abgeschlossen wurde. Aus diesem Grund ist während des Scheduling eine Randbedingung für den frühesten Verfügbarkeitszeitpunkt zu implementieren (vgl. Abschnitt 6.2.4)

$$TVF_{i'_2,x} < TVE_{i'_1,x-1} + t_{\hat{U}_{i,x}} \quad \text{für } J_{i'_1}, J_{i'_2} \in J_i \quad (6.8)$$

Die Gültigkeit kann im Rahmen des Scheduling wiederhergestellt werden, indem die Arbeitsvorgänge, zu denen die betroffenen Werte für  $b_{i,j}$  gehören, erst eingeplant werden, wenn die Randbedingung erfüllt ist. Bis dahin werden sie durch die folgenden Arbeitsvorgänge übersprungen. Diese Lösung erfordert nur wenige Rechenoperationen, dafür entspricht die Auftragsfolge im Ablaufplan nicht mehr der Auftragsfolge, die durch die ARF-Matrix ausgedrückt wird. Es findet somit eine erneute Änderung der Lösung statt. Sofern die ARF-Matrix nicht direkt für die Berechnung der Rüstkosten herangezogen wird, hat dies keine Auswirkungen auf die Lösungsgüte.

## **7 Ortungsbasierte echtzeitnahe Datenerfassung**

Die adaptive Werkstattsteuerung erfordert echtzeitnahe Daten über den aktuellen Status der Aufträge (s. Abschnitt 1.3 und 2.3.3). Dieses Kapitel behandelt die Erfassung des Auftragsstatus auf Basis von Daten, die durch permanente Ortung der Objekte in der Fertigung gewonnen werden. Somit wird die Voraussetzung zur Realisierung einer adaptiven Steuerung für manuelle Werkstattfertigungssysteme geschaffen.

### **7.1 Ortungstechnologien**

Für die Realisierung der permanenten Datenerfassung sind, wie in Abschnitt 2.3.3 dargelegt, diverse Technologien zur Ortung verfügbar. Sofern die an den Objekten angebrachten Transponder keine weiteren Funktionen außerhalb der echtzeitnahen Datenerfassung zu erfüllen haben, ist die verwendete Technologie, solange sie den Ortungsanforderungen genügt, nicht von Relevanz. Nach TESORIERO ET AL. (2010) ist dabei u. a. die Abweichung zwischen erfasseter und tatsächlicher Position (Ortungsgenauigkeit), die relative Häufigkeit der Messungen, in denen die Ortungsgenauigkeit erfüllt wird, die Anpassung auf Umgebungsveränderungen sowie das Antwortzeitverhalten von Relevanz.

Aufgrund der Fähigkeiten der am Markt verfügbaren Ortungssysteme kann die echtzeitnahe Bereitstellung der Position eines Auftrags in Form von Koordinaten oder, wie es einige Systeme (vgl. UBISENSE 2011) anbieten, einer Zonenzuordnung vorausgesetzt werden.

Die Ableitung des Auftragsstatus erfordert darüber hinaus eine Anreicherung der Ortsdaten mit Kontextinformationen. Auf den Zusammenhang wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

### **7.2 Zusammenhang zwischen Ort und Zustand**

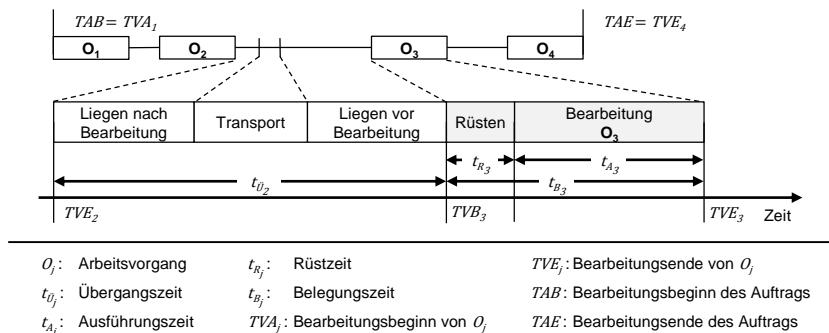
#### **7.2.1 Ansatz der Bewegungslogiken**

In der Werkstattfertigung ist der Materialfluss durch die Bearbeitungsanforderungen der meist heterogenen Produkte bestimmt (vgl. Abschnitt 1.2.1) und lässt sich als Abfolge von nacheinander durchlaufenden Orten innerhalb der

Werkstatt interpretieren. Diese Ortsabfolge wird im Folgenden als *Bewegungslogik* bezeichnet. Auf Arbeitssystemebene ist die Ortsabfolge im Arbeitsplan hinterlegt, der die „*Folge der Fertigungs-/Arbeitsvorgänge (Fertigungsablauf) und die Arbeitssysteme*“ enthält, „*die für eine schrittweise Aufgabendurchführung erforderlich sind.*“ (DANGELMAIER 2001, S. 469).

Zwischenlagerungen und Fördervorgänge sind demnach nicht im Arbeitsplan enthalten (vgl. DANGELMAIER 2001, S. 469). Aufgrund des hohen Anteils an Liegezeiten (vgl. Abschnitt 1.2.1) sind Zwischenlagerprozesse von hoher Bedeutung für die Bestimmung des Auftragsstatus. Bisherige Arbeiten (z. B. KLEIN 2011) verfolgen Aufträge ausschließlich auf Arbeitsplanebene, was eine Bestimmung des aktuellen Bereichs, nicht aber des entsprechenden Bearbeitungsstatus ermöglicht. Diese Granularität ist für Fließfertigungen, in denen eine FIFO-Bearbeitung stattfindet und die Verweilzeit in Pufferlagern bekannt ist, ausreichend. Zur Bereitstellung einer Datenbasis für die adaptive Werkstattsteuerung ist hingegen eine wesentlich höhere Datengranularität als die der arbeitsplanbasierten Bewegungslogiken erforderlich.

Die zeitliche Entsprechung des auftragsabhängigen Materialflusses ist die Durchlaufzeit, die sich wiederum aus verschiedenen Einzelzeiten zusammensetzt. Im Einzelnen sind dies „*Vorbereitungs- und Organisationszeiten, Rüstzeiten, Prozesszeiten, Prüfzeiten, Transport- und Liegezeiten sowie Nebenzeiten, wie z. B. Verpacken, Beschriften, Etikettieren, usw.*“ (WESTKÄMPER 2006, S. 71). Diese Zeitarten sind zu den Durchlaufzeitelementen Liegen vor bzw. nach Bearbeitung, Transport, Rüsten und Bearbeiten zu aggregieren, deren Abfolge auch als Durchlaufelement bezeichnet wird (vgl. WIENDAHL 1987a, S. 48ff.). Innerhalb des Durchlaufelementes lassen sich alle zur Berechnung der Zielfunktion erforderlichen Zeitpunkte und Zeiten abgrenzen (s. Abb. 7.1).



**Abb. 7.1:** Durchlaufelement und zugehörige Zeitpunkte sowie Zeiten (in Anlehnung an WIENDAHL 2010, S. 263)

Eine Unterscheidung der einzelnen Durchlaufzeitelemente anhand der Position eines Auftrags in der Fertigung ermöglicht somit die Ableitung des Produktionszustands. Um dies zu ermöglichen ist eine Definition der Flächen erforderlich, mit denen die sich darauf befindenden Aufträge eindeutig zu den Durchlaufzeitelementen zuordnen lassen.

Im folgenden Abschnitt sind die Flächen beschrieben, die sich durch ihre Funktion unterscheiden und somit eine Unterscheidung der einzelnen Durchlaufzeitanteile ermöglichen.

### 7.2.2 Gliederung der Werkstatt

Die einzelnen Bereiche im Werkstattlayout erfüllen verschiedene Funktionen im Betriebsablauf, von denen das Fertigen, Bereitstellen und Transportieren von Teilen und Komponenten als wesentlich zu nennen sind (PIPHO 1979, S. 2).

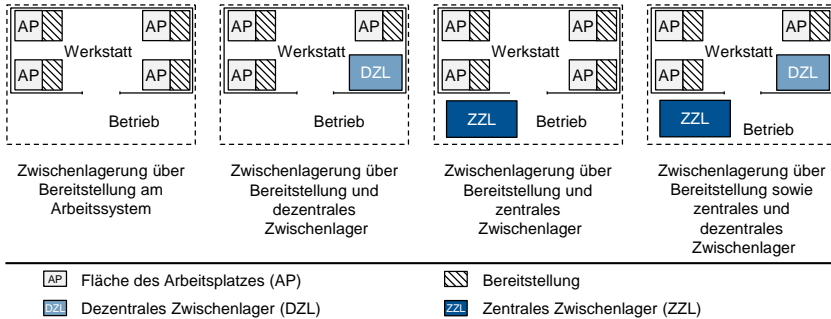
Frühere Forschungsarbeiten, die sich mit der Flächenaufteilung in Werkstätten befassen, führt PIPHO (1979, S. 7ff.) auf. Demnach besteht Einigkeit über die Fertigungsfläche, die Zwischenlagerfläche sowie die Transport- und Verkehrsfläche (vgl. z. B. NESTLER 1969, S. 18f.; ROCKSTROH 1982, S. 40ff.). Die übrigen Flächen fasst z. B. NESTLER (1969, S. 19) unter dem Begriff Zusatzfläche zusammen.

Von Relevanz für die Ableitung von Statusinformationen sind alle Flächen, die im Fertigungsverlauf von den Aufträgen durchlaufen werden. Entgegen der Einteilung in der Literatur ist es für diesen Anwendungsfall nicht sinnvoll, zwischen Maschinenflächen, Handarbeits- und Prüfplätzen zu unterscheiden, da die dort verrichteten Tätigkeiten in der Regel im Arbeitsplan vermerkt sind. Diese Flächen werden im Folgenden als Fertigungsflächen bezeichnet.

Die Zwischenlagerflächen lassen sich nach NESTLER (1969, S. 20) in die Bereitstellungsfläche an der Maschine sowie davon unabhängige Sammlagerflächen aufteilen.

Für die Zwischenlagerung der Aufträge zwischen zwei Bearbeitungsschritten zum Mengen- und Zeitausgleich existierenden verschiedene Lagermodelle (PIPHO 1979, S. 42ff.). Dabei wird zwischen Bereitstellung an der Maschine, dezentraler Zwischenlagerung in der Werkstatt und zentraler Zwischenlagerung im Betrieb unterschieden, aus denen sich die in Abb. 7.2 dargestellten praxisrelevanten Zwischenlagermodelle zusammensetzen (vgl. auch PIPHO 1979, S. 45ff.). Als Bezugsgröße ist jeweils eine Werkstatt gewählt, die mehrere Maschinen enthält.

Grundsätzlich hat das angewendete Lagermodell keinen Einfluss auf den Ablauf der Werkstattsteuerung. Bei der Definition des Auftragsstatus ist hingegen zu



**Abb. 7.2:** Praxisrelevante Zwischenlagermodelle in Anlehnung an PIPHO (1979, S. 45ff.)

beachten, dass Aufträge, die sich in einem zentralen Zwischenlager befinden, aufgrund von Auslager- und Transportzeiten nicht kurzfristig für die Bearbeitung zur Verfügung stehen.

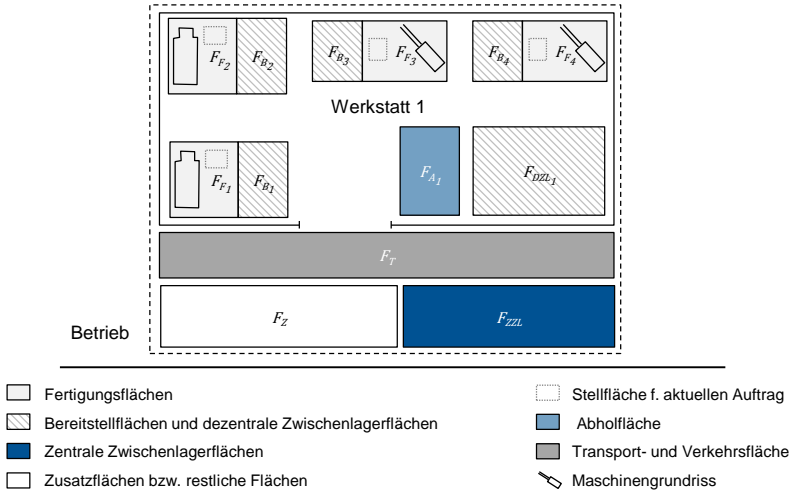
In den Modellen von NESTLER (1969, S. 18ff.) sind keine Lagerflächen für Aufträge vorgesehen, die nach Bearbeitung auf den Weitertransport warten, sodass eine Vermischung mit wartenden Aufträgen anzunehmen ist. Da für die Bestimmung des Auftragsstatus eine Unterscheidung von wartenden und bereits bearbeiteten Aufträgen erforderlich ist, ist zusätzlich eine separate Abholfläche zu definieren. Dies wird als Ausgangslager entweder pro Arbeitssystem oder pro Werkstatt eingerichtet (vgl. auch KRÄMER 1968, S. 219).

Weiterhin erfordert die eindeutige Unterscheidung des Auftragsstatus eine Fläche in Maschinennähe, auf der das Transporthilfsmittel, der zu ortende Transponder sowie ggf. weitere Teile des Auftrags abgestellt werden können. Systemisch ist keine Abgrenzung zur Fertigungsfläche erforderlich, in der realen Werkstatt ist dagegen eine physische Fläche vorzusehen, um den sich in Bearbeitung befindenden Auftrag von denen, die auf Bearbeitung warten, abzugrenzen.

Für die ortungsgestützte Ableitung von Statusinformationen sind somit die in Abb. 7.3 dargestellten Flächen zu definieren, die in Bezug auf die Werkstatt  $ws$  oder die darin enthaltenen Arbeitssysteme  $k$  (d. h.  $k \in ws$ ) folgt definiert sind:

- Fertigungsfläche  $F_{F_k}$ : Fläche, die durch das Arbeitssystem  $k$  eingenommen wird, inklusive der Fläche, auf der ein Auftrag bzw. sein zugehöriges Transporthilfsmittel während der Bearbeitung gelagert wird.



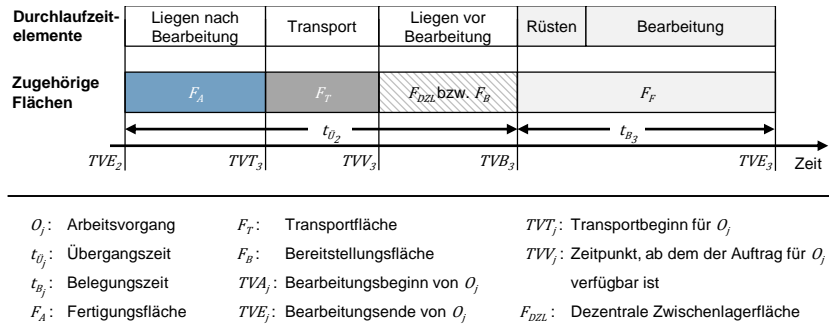


**Abb. 7.3:** Flächen eines werkstattfertigen Betriebs zur ortungsgestützten Ableitung von Statusinformationen

- Bereitstellfläche  $F_{B_k}$ : Fläche, auf der Aufträge auf die Bearbeitung durch das Arbeitssystem  $k$  warten. Wenn dezentrale Zwischenlagerflächen vorhanden sind, ist diese Fläche optional.
- Abholfläche  $F_{A_{ws}}$ : Fläche, auf der fertiggestellte Aufträge eines Arbeitssystems in Werkstatt  $ws$  auf den Weitertransport warten.
- Dezentrale Zwischenlagerfläche  $F_{DZL_{ws}}$ : Fläche, auf der Aufträge auf die Bearbeitung durch ein Arbeitssystem in Werkstatt  $ws$  warten. Wenn Bereitstellflächen vorhanden sind, ist diese Fläche optional.
- Zentrale Zwischenlagerfläche  $F_{ZZL}$ : Fläche, auf der Aufträge für eine spätere Bearbeitung zwischengelagert werden. Diese Fläche ist optional. Sofern mehrere Flächen  $F_{ZZL}$  existieren, sind diese entsprechend zu unterscheiden.
- Transport- und Verkehrsfläche  $F_T$ : Zusammenfassung aller Flächen, die für den Transport der Aufträge vorgesehen sind.
- Zusatzfläche  $F_Z$ : Zusammenfassung aller Flächen, die nicht oder nur in Ausnahmefällen durch Aufträge belegt oder durchquert werden.

Eine vollständige Zuordnung aller Betriebsflächen ist dabei nicht erforderlich. Wie in Abb. 7.3 dargestellt, können z. B. Wegflächen innerhalb einer Werkstatt undefiniert bleiben.

Der Zusammenhang zwischen den Durchlaufzeitelementen (s. Abb. 7.1) und den entsprechenden Flächen ist in Abb. 7.4 dargestellt.



**Abb. 7.4:** Zusammenhang zwischen steuerungsrelevanten Zeitpunkten und Werkstattflächen

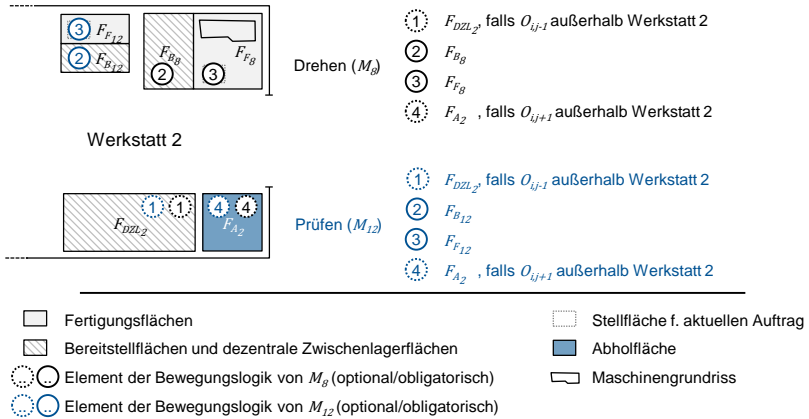
### 7.2.3 Definition des Ortungsobjektes

Darüber hinaus erfordert die exakte Erfassung auch eine geeignete Definition des zu ortenden Objekts. Da über die Ortung Bewegungen erfasst werden, ist die Transporteinheit eines Auftrages eine geeignete Größe, da die darin gebundene Auftragsmenge in der Regel als Ganzes transportiert wird und während der Bearbeitung ein Fertigungslos bildet. Nach NESTLER (1969, S. 53) kann die Transporteinheit dabei entweder das Werkstück selbst oder ein Transporthilfsmittel (z. B. Behälter, Palette) sein. Sofern ein Auftrag mehr als eine Transporteinheit umfasst, ist dieser entweder in Teilaufträge aufzuteilen oder die Möglichkeit einer Rückmeldung von Teilmengen zu schaffen (z. B. durch eine hierarchische Gliederung von Auftragslosgröße und Transportlosgrößen). Während die erste Option es ermöglicht, Zwischenaufträge in einen Großauftrag einzuschieben (zwischen zwei Transporteinheiten) kann durch die zweite Option eine überlappende Fertigung realisiert werden.

### 7.2.4 Ableitung des Auftragsstatus

Die im vorhergehenden Abschnitt definierten Werkstattflächen sind die Basis zur Ableitung von arbeitssystemspezifischen Bewegungslogiken höherer Granularität. Für jede auftragsspezifische Abweichung sind, wie in Abb. 7.5 dargestellt, entsprechende Teil-Bewegungslogiken zu definieren, aus denen die Bewegungslogik eines Auftrags durch Zusammensetzen anhand der im Arbeitsplan definierten Vorgänge abzuleiten ist. Die Erstellung auftragsspezifischer

Bewegungslogiken erfolgt bei vollständig definierten Teil-Bewegungslogiken automatisiert.



**Abb. 7.5:** Beispiel einer Bewegungslogik für zwei Arbeitsplätze

Das Beispiel in Abb. 7.5 für Arbeitssystem  $M_8$  in Werkstatt 2 (entspricht Fertigungsfläche  $F_{F_8}$ ) hat eine Bewegungslogik, nach der die Aufträge zunächst auf der dezentrale Zwischenlagerfläche  $F_{DZL_2}$  und von dort vor geplantem Beginn auf die Bereitstellfläche  $F_{B_8}$  vor Arbeitssystem 8 wechseln. Alternativ werden dringende Aufträge direkt nach Eingang in die Werkstatt auf der Bereitstellfläche  $F_{B_8}$  abgestellt, sodass ein Überspringen der Fläche  $F_{DZL_2}$  ohne Konsequenzen bleibt. Zum Bearbeitungsbeginn wird der Auftrag direkt an der Maschine von Arbeitssystem 8 auf der definierten Stellfläche von Fertigungsfläche  $F_{F_8}$  platziert und dort bearbeitet. Nach Fertigstellung erfolgt eine arbeitsplanabhängige Fallunterscheidung. Sofern nach Arbeitsplan ein Prüfvorgang anschließt, ist die Bewegungslogik abgeschlossen und es wird mit der Bewegungslogik des darauffolgenden Prüfarbeitsplatz 12 fortgeführt. Dieselbe Vorgehensweise wird angewendet, wenn die folgende Bearbeitung an einem weiteren Arbeitssystem von Werkstatt 2 erfolgt. Sofern der Auftrag die Werkstatt 2 für den Folgearbeitsgang verlässt, wird die Bewegungslogik mit der Abholfläche  $F_{A_2}$  von Werkstatt 2 fortgesetzt.

Wie das o. g. Beispiel zeigt, sind die arbeitssystemspezifischen Bewegungslogiken von der jeweiligen Praxissituation abhängig und somit für jede Werkstattfertigung individuell auf Basis der oben beschriebenen Flächen zu definieren.

Für die Ableitung der steuerungsrelevanten Zeitpunkte ist der in Abb. 7.4 dargestellte Zusammenhang heranzuziehen.

Neben den für die Berechnung der Zielfunktion notwendigen Beginn- und Endzeitpunkten der Arbeitsvorgänge können somit auch die Zeitpunkte  $TVT_{i,j}$  und  $TVV_{i,j}$  abgeleitet werden.  $TVT_{i,j}$  bezeichnet den Transportbeginn zur  $j$ -ten Operation von Auftrag  $i$  und lässt somit den Schluss zu, dass Auftrag  $i$  in Kürze verfügbar ist.  $TVV_{i,j}$  ist der Zeitpunkt, ab dem Auftrag  $i$  für die  $j$ -te Operation verfügbar ist und somit auch im Rahmen von Steuerungsmaßnahmen zu jedem Zeitpunkt eingeplant werden kann. Sofern ein oder mehrere zentrale Zwischenlager existieren, in denen Aufträge zwischen zwei Fertigungsschritten eingelagert werden, ist die Ableitung von  $TVT_{i,j}$  nicht möglich, es sei denn, die Zwischenlagerung ist im Arbeitsplan definiert. Das Vorsehen einer zentralen Zwischenlagerung kann hingegen regelbasiert erfolgen, wenn z. B. zwischen dem Ende eines Arbeitsvorgangs und dem geplanten Beginn des darauffolgenden Arbeitsvorgangs eine definierte Mindestzeitspanne überschritten wird, ab der immer eine zentrale Zwischenlagerung erfolgt. In diesem Fall wird der Zeitpunkt  $TVT_{i,j}$  dann ausgegeben, wenn der Auftrag das Zwischenlager verlässt und ein zweites Mal nach Bearbeitung in die Transportfläche eintritt.

Sofern der reale Bewegungsablauf des Auftrags der Bewegungslogik entspricht, können automatisiert an den in Abb. 7.4 definierten Übergängen Zeitstempel erstellt und somit der Auftragsstatus aktualisiert werden. Auf diese Weise erfolgt eine permanente Überwachung des Auftragsstatus.

### 7.2.5 Ableitung des Ressourcenstatus

Die Zeitpunkte  $TVB_{i,j}$  und  $TVE_{i,j}$ , mit denen Beginn und Ende einer Bearbeitung beschrieben sind, korrelieren mit der Belegungszeit der zugehörigen Maschine  $\mu_{i,j}$ , sodass sich diese Informationen zum Ressourcenstatus ebenfalls ortungsbasiert ableiten lassen. Weitere relevante Informationen wie z. B. Maschinenstörungen sind hingegen nicht über Objektortung zu erfassen, sodass der Ressourcenstatus um weitere Informationen ergänzt werden muss. Diese Informationen werden im weiteren Verlauf (Abschnitt 7.5) detailliert.

### 7.2.6 Maßnahmen zur exakten Flächenzuordnung

Sofern die Software des verwendeten Ortungssystems keine zuverlässige Flächenzuordnung ausgibt, ist eine eindeutige Erkennung von Transportvorgängen zwischen zwei Flächen erforderlich. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn das Werkstück durch Bereiche transportiert wird, die nicht als neuer Ort übernommen werden sollen (z. B. aufgrund einer Abkürzung durch den transportierenden Mitarbeiter).

Eine Möglichkeit ist die Definition einer Mindestgeschwindigkeit für Bewegungsvorgänge, bei deren Unterschreitung ein Stillstand und somit ein Abstellen des Werkstücks angenommen wird. Neben der Mindestgeschwindigkeit kann die

Erkennung auch durch die Länge des Zeitintervalls, in denen die Mindestgeschwindigkeit unterschritten sein muss, beeinflusst werden. Dieses Zeitintervall dient dazu, eine Übernahme des Ortes zu verhindern, wenn der transportierende Werker lediglich einen kurzen Stopp oder Richtungswechsel vornimmt.

Alternativ kann die eindeutige Erkennung eines Flächenwechsels anhand der Veränderungen der Koordinaten in einem definierten Zeitintervall erfolgen. Hierzu ist eine Schwankungstoleranz zu definieren, deren Höhe sich an der Mess- und Wiederholgenauigkeit des Ortungssystems bemisst. Weiterhin ist festzulegen, wie viele aufeinanderfolgende Messwerte herangezogen werden (Länge des Zeitintervalls) und wie viele Messwerte bzw. Koordinaten sich innerhalb der Schwankungstoleranz befinden dürfen, um einen Stillstand zu detektieren. Die exakten Messwerte sind für jeden Anwendungsfall durch Versuche zu bestimmen.

Da sich technologiebedingte Ungenauigkeiten in der Flächenzuordnung nicht immer vermeiden lassen, sind Falschmessungen durch die Überprüfung logischer Zusammenhänge korrigieren.

Bedingt durch die Werkstatttopologie sind einige Auftragsbewegungen in der Realität nicht möglich. So kann sich ein Auftrag z. B. nicht innerhalb einer Säule aufhalten oder durch Wände bewegen. Somit sind bauliche Restriktionen der Auftragsbewegungen in Anlehnung an KLINGBEIL & WARK (2008) und D'SOUZA ET AL. (2013) zu modellieren. Im Falle einer als unzulässig erkannten Bewegung oder einer unzulässigen Flächenzuordnung kann anschließend eine Korrektur der Flächenzuordnung vorgenommen werden. Wenn ein Auftrag z. B. erst an der einen und dann an der anderen Seite einer Wand geortet wird, ist aufgrund der Unmöglichkeit dieses Ortswechsels ohne einen Weg um die Wand herum genommen zu haben, anzunehmen, dass sich der Auftrag noch auf der gleichen Seite der Wand befindet. Die Position kann durch einen Abgleich mit dem Modell der baulichen Restriktionen automatisiert korrigiert und die Zuverlässigkeit gesteigert werden.

Wie bereits bei der Stillstandsdetektion kann die Objektgeschwindigkeit auch für die Korrektur von Messwerten herangezogen werden. Die Aufträge werden in der Regel durch den Menschen oder Flurförderfahrzeuge bewegt, deren Maximalgeschwindigkeiten abschätzbar sind. Da Echtzeitortungssysteme die Koordinaten des zu ortenden Objektes in der Regel in festen Zeitabständen ermitteln, lässt sich anhand von zwei Koordinaten sowie des Zeitabstands die theoretische Bewegungsgeschwindigkeit berechnen. Wenn diese größer als die reale Maximalgeschwindigkeit ist, liegt ein Messfehler vor. Die geortete Position kann somit verworfen werden und erst der folgende Messwert wieder zur Datenermittlung herangezogen werden.

### 7.3 Modellierung

#### 7.3.1 Modellierung der Werkstatt

Die Modellierung der Werkstatt erfolgt durch eine Diskretisierung der Bereiche, indem ein Punktraster über den gesamten Fertigungsbereich gelegt wird (vgl. ortsbasierte Karten nach THRUN ET AL. 2005, S. 152; PELLENZ 2011, S. 20f.). Die Auflösung des Rasters determiniert die Granularität, in der die Zuordnung erfolgt. Jedem Punkt im Raster wird eine Zahl zugeordnet, die der Nummerierung der entsprechenden Flächen entspricht. Geortete Auftragskoordinaten werden dem nächstgelegenen Punkt im Raster und damit auch einem Werkstattbereich zugeordnet. Abb. 7.6 zeigt die beispielhafte Modellierung einer Werkstatt als Raster, wobei die jeweilige Flächenunterscheidung durch die Nachkommastelle vorgenommen wird. Da jede Flächenart sich entweder auf die Werkstatt *ws* oder das Arbeitssystem *k* bezieht, ist eine eindeutige Unterscheidung der Flächen möglich. Die das Betriebslayout beschreibende Matrix wird im Folgenden als Betriebslayoutmatrix (BLM) bezeichnet. Der Vorteil dieser Modellierung ist die einfache Speicherung und Weiterverarbeitung der Daten. Darüber hinaus können Änderungen schnell eingepflegt und auch komplexere Flächen leicht modelliert werden. Nachteilig ist dagegen das Entstehen großer Datenmengen, wenn große Fabrikbereiche mit einer feinen Rasterauflösung modelliert werden.

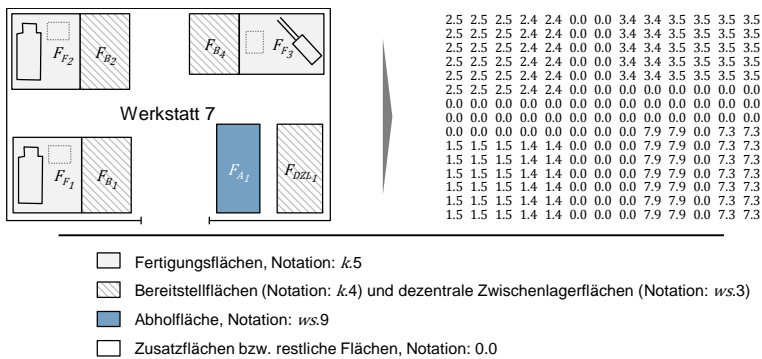


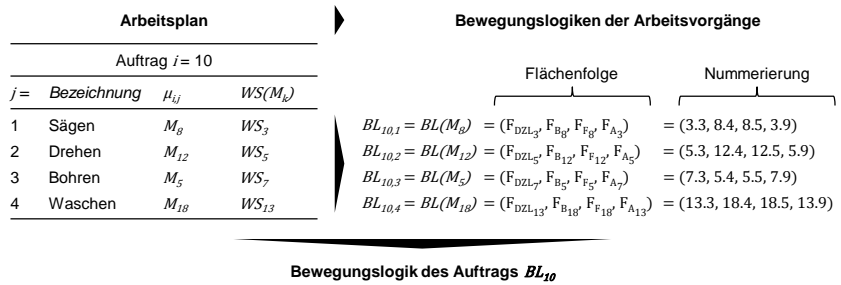
Abb. 7.6: Beispielhafte Modellierung einer Werkstatt als Punktraster

Alternativ können die Bereiche auch anhand ihrer definierenden Koordinaten (Außenkanten, Eckpunkte) modelliert werden (vgl. merkmalsbasierte Karten nach THRUN ET AL. 2005, S. 152; PELLENZ 2011, S. 17ff.). Jeder Flächenbeschreibung ist die Nummer des entsprechenden Bereichs zuzuweisen. Für geortete Auftragskoordinaten sind die zugehörigen Flächen über Rechenoperationen zu ermitteln. Die Umsetzung dieser Modellierung ist aufwendiger, im

Gegenzug wird der Speicheraufwand nicht durch die Größe des Fabrikbereichs, sondern durch die Anzahl und geometrische Komplexität der entsprechenden Bereiche determiniert.

### 7.3.2 Modellierung der Bewegungslogiken

Jede Bewegungslogik ist gemäß Annahme AN 4 eine lineare Abfolge von Flächen. Die Modellierung erfolgt daher als n-Tupel, deren Komponenten die Nummern der entsprechenden Flächen in der Abfolge der Bewegungslogik enthalten. Dabei wird, wie in Abb. 7.7 dargestellt, die auftragspezifische Bewegungslogik  $BL_i$  anhand des Arbeitsplans aus den arbeitssystemspezifischen Teil-Bewegungslogiken  $BL_{\mu_i,j}$  zusammengesetzt. Die Notation entspricht der Definition in Abb. 7.6.



**Abb. 7.7:** Zusammensetzen einer Auftrags-Bewegungslogik aus den jeweiligen Teil-Bewegungslogiken der Arbeitsvorgänge (Beispiel)

Mathematisch ist dieser Zusammenhang wie folgt definiert:

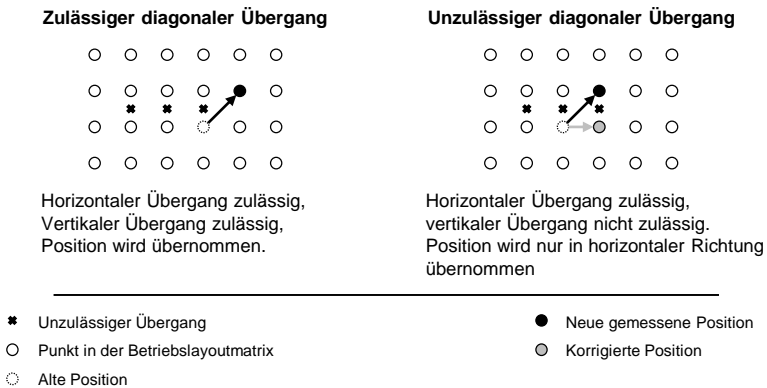
$$BL_i = (BL_{i,1}, BL_{i,2}, \dots, BL_{i,n_i}) \text{ mit } BL_{i,j} \in BL_{\mu_{i,j}} \in BL_{M_k}$$

Durch den Abgleich der Ist-Fläche mit der in der Bewegungslogik definierten Fläche werden im Falle einer Übereinstimmung die entsprechenden Statusänderungen initiiert sowie die zugehörigen Zeitpunkte ausgeleitet. Sofern eine Nicht-Übereinstimmung vorliegt, wird über eine Kommunikationsschnittstelle zum Werker abgefragt, ob die Abweichung erwünscht oder unerwünscht ist und so entweder die Bewegungslogik oder der Ort des Auftrags korrigiert. Bei der Wahl des Kommunikationsmittels ist daher auf ein schnelles Antwortzeitverhalten, z. B. durch Nutzung von Smart Devices, zu achten, um schnellstmöglich eine Rückmeldung zu erhalten.

### 7.3.3 Modellierung baulicher Restriktionen

Der Abgleich unzulässiger Bewegungen, wie in Abschnitt 7.2.6 beschrieben, erfordert die Modellierung realer baulicher Restriktionen im Werkstattlayout. In Abhängigkeit der gewählten Modellierung (vgl. Abschnitt 7.3.1) kann dies durch Matrizen, in denen die einzelnen Übergänge zwischen den Punkten in der Betriebslayoutmatrix jeweils für die horizontale und vertikale Richtung modelliert sind, erfolgen. Bei einer Modellierung der Werkstattflächen durch deren geometrische Beschreibung sind die unzulässigen Bereiche ebenfalls geometrisch zu beschreiben.

Unabhängig von der gewählten Modellierungsart findet nach jeder neu erkannten Position ein Abgleich statt, ob diese in einem unzulässigen Bereich liegt oder ob auf dem Weg zwischen der alten und neuen Position unzulässige Übergänge erfolgten. Sofern keine unzulässigen Bewegungen erfolgt sind, wird der neue Bereich in das System übernommen und ggf. eine Statusaktualisierung erzeugt. Andernfalls wird die alte Position im System beibehalten. Die getrennte Überprüfung horizontaler und vertikaler Übergänge ermöglicht bei diagonalen Übergängen eine Korrektur der Position, sodass hier nicht die alte Position beibehalten wird, sondern ein errechneter Korrekturwert. Ein Beispiel ist in Abb. 7.8 dargestellt.



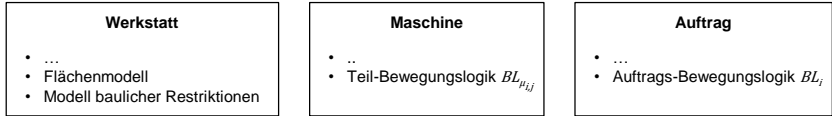
**Abb. 7.8:** Korrektur unzulässiger Bewegungen in diagonalen Richtung

### 7.3.4 Erweiterung des Datenmodells

Zur Realisierung der ortungsbasierten Datenerfassung ist das in Abschnitt 4.4 beschriebene Datenmodell um die in Abb. 7.9 zugeordneten Attribute zu ergänzen. Dies sind das Flächenmodell der Werkstatt sowie das Modell der



baulichen Restriktionen, zudem die Teil-Bewegungslogiken für die einzelnen Maschinen. Daraus setzen sich die Bewegungslogiken jedes Auftrags zusammen, die ebenfalls abzuspeichern sind.



**Abb. 7.9:** Ergänzung von Attributen im Datenmodell aus Abb. 4.7

## 7.4 Ablauf der ortungsbasierten Datenerfassung

Die ortungsbasierte Datenerfassung besteht aus zwei Abläufen. Der erste Ablauf ist die Erstellung der Bewegungslogiken (Abb. 7.10a), die einmalig bei der Auftragsfreigabe sowie nach jeder Änderung in der Maschinenfolge (bzw. im Arbeitsplan) erfolgt. Der zweite Ablauf umfasst die Datenerfassung (Abb. 7.10b) und wird bei jeder Erfassung einer neu gemessenen Ortskoordinate initiiert.

Der Ausgabewert in Form eines Zeitstempels wird im zugehörigen Datenmodell des aktuell gültigen Ablaufplans  $P_{Aktuell}$  an Stelle der zugehörigen Plan-Zeitpunkte gesetzt, sodass die darauf aufsetzende adaptive Produktionssteuerung mit diesen Daten in Echtzeit arbeiten kann.

## 7.5 Korrektur und Ergänzung von Informationen

Die automatisierte Ableitung von Betriebsdaten durch Objektortung erfordert ein hohes Maß an vordefinierten Prozessen sowie ein Einhalten der im System hinterlegten Flächen für bestimmte Positionen im Auftragsstatus. Insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung treten häufig Änderungen im Produktionsablauf auf (z. B. durch Nacharbeit), sodass nicht in jedem Fall die ursprünglich anhand des Arbeitsplans abgeleitete Bewegungslogik dem in der Realität vorgesehenen Weg durch die Fertigung entspricht. Darüber hinaus können auch fehlerhafte Materialtransporte oder andere, von der Bewegungslogik abweichende Handlungen in der Werkstatt zu einer Fehlinterpretation führen. Somit ist eine Korrekturmöglichkeit dieser Informationen durch den Werker erforderlich.

Neben den Start- und Endzeitpunkten der einzelnen Elemente im Durchlaufelement erfordert das System zur adaptiven Werkstattsteuerung auch weitergehende Informationen möglichst in Echtzeit, wie beispielsweise die Startzeit und die voraussichtliche Dauer einer Maschinenstörung. Diese können häufig nur durch eine Person vor Ort abgeschätzt werden, sodass hier eine Schnittstelle für

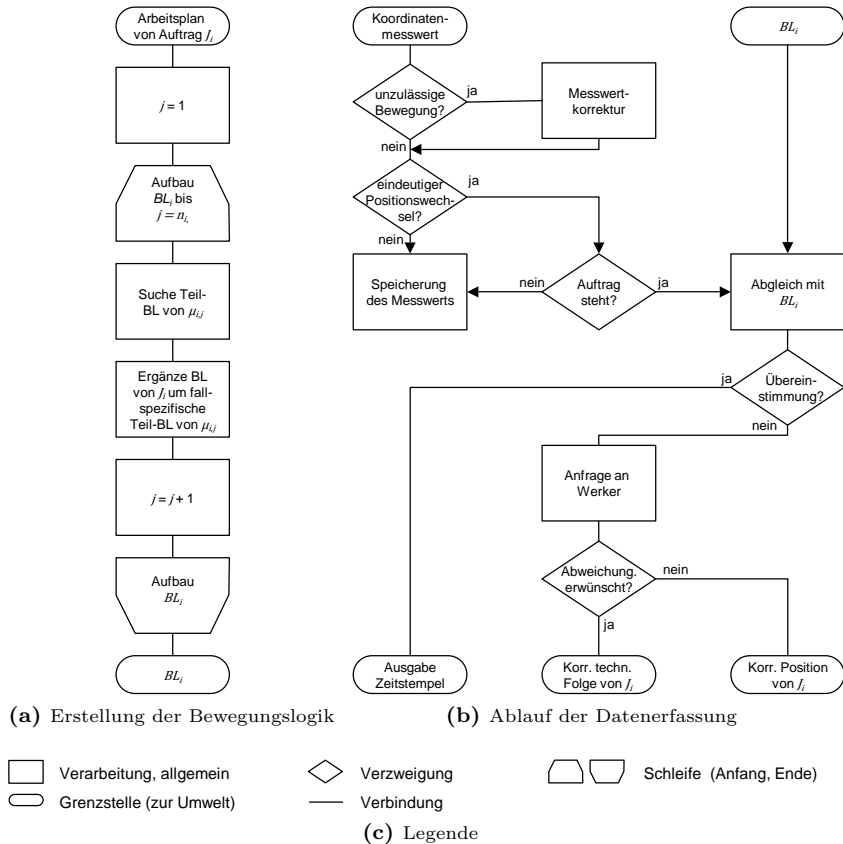
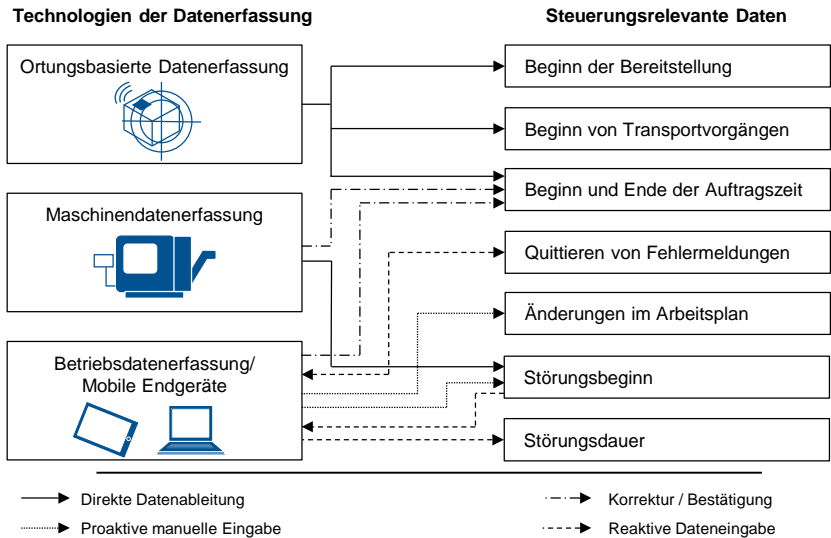


Abb. 7.10: Abläufe der ortungsbasierten Datenerfassung (Darstellung nach DIN 66001 1983)

die Mensch-Maschine-Kommunikation zu schaffen ist. Wie in Abschnitt 7.3.2 bereits erwähnt, ist bei der Wahl des Kommunikationsmittels auf schnelle Rückmeldemöglichkeiten zu achten.

Abb. 7.11 gibt eine Übersicht über die zu erfassenden Daten und die zugehörigen Technologien, die im Folgenden näher beschrieben sind.



**Abb. 7.11:** Ergänzung der ortungsbasiert erfassten Daten durch weitere Erfassungstechnologien

### 7.5.1 Erweiterung um BDE/MDE

Moderne Systeme der Maschinendatenerfassung ermöglichen die direkte Erfassung des Bearbeitungsfortschritts eines Auftrags (vgl. JANSEN ET AL. 1993, S. 157f.; KLETTI 2006, S. 32). Eine Anbindung dieser Systeme ermöglicht somit, die mittels Objektortung hergeleiteten Start- und Endzeitpunkte der Auftragszeit zu bestätigen oder ggf. zu korrigieren. Zudem können Maschinenstörungen erfasst und somit der Beginn einer Störung ausgegeben werden. Ein dritter Aspekt ist die mögliche Trennung von Rüst- und Bearbeitungsvorgängen innerhalb der Maschinenbelegung.

Über Terminals der Betriebsdatenerfassung (vgl. Abschnitt 1.2.4) ist zudem eine Schnittstelle zum Werker an der jeweiligen Maschine zu schaffen. Dieser hat dadurch die Möglichkeit, bei der erforderlichen Betriebsdatentrückmeldung die ortungsbasiert interpretierten Zeitpunkte zu bestätigen oder zu korrigieren. Erst im Anschluss findet eine Aktualisierung der Daten in übergeordneten Systemen wie z. B. ERP statt. Darüber hinaus besteht über die Schnittstelle der BDE die Option, den Produktionsablauf an aktuelle Gegebenheiten der Produktion (z. B. Nacharbeit) manuell zu adaptieren, wie es im folgenden Abschnitt detailliert ist.

### 7.5.2 Ergänzung manuell zu erfassender Daten

Zahlreiche Situationen, die im realen Produktionsablauf entstehen, können nicht automatisiert über Regeln o. Ä. interpretiert werden und erfordern eine menschliche Interpretation sowie deren Eingabe in das Steuerungssystem. Auf diese Weise sind Schnittstellen zu schaffen, über die manuelle Eingaben zur Erweiterung der Datenbasis erfolgen.

Neben dem bereits beschriebenen Bestätigen oder Korrigieren der Betriebsdaten zur Rückmeldung ist insbesondere die Adaption des Produktionsablaufs von Bedeutung. Sobald absehbar ist, dass sich der Produktionsverlauf ändert, zusätzliche Arbeitsvorgänge anfallen oder andere Maschinen ausgewählt werden, sind diese Informationen proaktiv im hinterlegten Arbeitsplan anzupassen. Dies ist notwendig, da die o. g. Änderungen sowohl die korrekte ortungsbasierte Datenerfassung als auch andere Aufträge, insbesondere an Engpassmaschinen, durch Änderungen im weiteren Produktionsablauf betreffen. Eine weitere proaktive Eingabe ist der Beginn einer Maschinenstörung, sobald diese erkannt wird, um über das Steuerungssystem zeitnah Reaktionsmaßnahmen anzustoßen.

Neben den proaktiven Eingaben sind durch das System auch gezielt Eingaben anzufordern. Dies betrifft zum einen die Quittierung einer Fehlermeldung der ortungsbasierten Datenerfassung, bei der die jeweils verantwortliche Person zu entscheiden hat, ob die laut System fehlerhafte Position aus einer Fehlhandlung resultiert, durch neue Gegebenheiten (z. B. spontane Änderung des Produktionsablaufs) bedingt ist oder ob ein Messfehler vorliegt. Eine weitere reaktive Eingabe ist die Angabe der Störungsdauer, die aufgrund einer Vielzahl von Einflussgrößen (z. B. Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturpersonal, Schwere der Störung) in der Praxis nicht regelbasiert bestimmt werden kann. Die reaktiven Eingaben werden durch das System angefordert und können z. B. über mobile Endgeräte oder vorhandene BDE-Terminals eingegeben werden. Aufgrund der breiten Verfügbarkeit dieser Technologien wird deren Umsetzung in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert.

## **8 Technische Umsetzung und Bewertung**

Um die technische Machbarkeit des in Kapitel 4 beschriebenen und in den Kapiteln 7 bis 6 detaillierten Systems zur adaptiven Werkstattsteuerung aufzuzeigen sowie einen Nachweis über die eintretende Verbesserung hinsichtlich der Zielsetzung zu erbringen, wird das System prototypisch umgesetzt.

Die Bewertung von Algorithmen und Systemen zur Produktionssteuerung erfordert eine dynamische Testumgebung, da eine statische Berechnung mit fixen Aufträgen nicht ausreicht (vgl. DIMITROV & BAUMANN 2009). Um zuvor Erkenntnisse über die Funktionsweise sowie den Wertebereich der einzustellenden Parameter des Algorithmus zu Reihenfolgeoptimierung (Kap. 6) zu bekommen, wird dieser zunächst als Softwareprototyp umgesetzt und anhand einfacher Beispielinstanzen parametrisiert (Abschnitt 8.1). Die Umsetzung des gesamten Steuerungssystems in einem dynamischen Umfeld erfolgt im Anschluss durch eine Ablaufsimulation (Abschnitt 8.2). Als Anwendungsbeispiel wird eine reale Werkstattfertigung für Fahrzeugkomponenten umgesetzt. Der Softwareprototyp der Reihenfolgeoptimierung wird als Programm in die Ablaufsimulation integriert. Auf die Umsetzung der ortungsbasierten Datenerfassung in der Ablaufsimulation wird verzichtet, da aufgrund der vollständigen softwaretechnischen Modellierung alle notwendigen Betriebsdaten, im Gegensatz zur realen, manuellen Werkstattfertigung, jederzeit verfügbar sind. Stattdessen erfolgt die Erprobung hinsichtlich der Realisierbarkeit der ortungsbasierten Datenerfassung (Kap. 7) in einem Laboraufbau (Abschnitt 8.3).

Im Anschluss an die technische Umsetzung erfolgen eine Bewertung anhand der in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen sowie eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

### **8.1 Softwareprototyp zur Reihenfolgeoptimierung**

#### **8.1.1 Allgemeines**

Der Algorithmus zur Optimierung der Auftragsfolge (Kapitel 6) ist vorab losgelöst vom übrigen Steuerungssystem in der Softwareumgebung MATLAB<sup>®</sup> R2015a implementiert worden, um die Einflussparameter festzulegen sowie um erste Erkenntnisse bzgl. der Leistungsfähigkeit und der Funktionsweise des Algorithmus zu erhalten.

Als Anwendungsfall wurde auf in der Literatur verfügbare Beispielinstanzen (vgl. Abschnitt 2.2.1.1) zurückgegriffen, da hierfür die Optimallösungen bekannt sind und somit eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit erfolgen kann. Da keine Beispielinstanzen für die Zielfunktion  $K_{red}$  existieren, wurde die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit  $C_{max}$  herangezogen. Für die Optimierung wurde zum einen die *FT10*-Instanz von FISHER & THOMPSON (1963) mit 10 Aufträgen und 10 Maschinen als übersichtliches Testproblem herangezogen, zum anderen die *TA71*-Instanz von TAILLARD (1993, 2012) mit 100 Aufträgen und 20 Maschinen als Problem mit realistischer Größenordnung.

Der eigentliche Algorithmus besteht aus der Startinitialisierung sowie dem fortlaufenden Generationenwechsel, in dem durch Mutation neue Lösungen erzeugt werden. Bis auf die Startinitialisierung entspricht dieser dem in Abb. 6.1 auf S. 114 dargestellten Ablauf

### 8.1.2 Initialisierung

Da im Gegensatz zum vorgesehenen Einsatz in der Produktionssteuerung bei den Beispielinstanzen keine Ausgangslösung existiert, ist ein zusätzlicher Algorithmus zur Erstellung der Startlösung erforderlich. Dieser wird auf einfache Weise durch schrittweise Anwendung der Prioritätsregel *Größte Restbearbeitungszeit (GRB)* (vgl. KIENER ET AL. 2012, S. 290) realisiert. Da insbesondere spät eingeplante Aufträge mit langer Restbearbeitungszeit die Gesamtdurchlaufzeit stark erhöhen, werden auf diese Weise schon zu Beginn kompakte Arbeitspläne erreicht. Die Startlösung der *FT10*-Instanz beträgt 1289 ZE, die der *TA71*-Instanz 8021 ZE.

Darüber hinaus sind folgende frei zu bestimmende Parameter festzulegen:

- Die Größe  $n_{pop}$  der Population *pop*,
- die maximale Distanz  $d_{max}$  zwischen zwei zu tausendenden Werten  $b_{i,k}$ ,
- die Akzeptanztoleranz einer Zielwertverschlechterung  $TOL_{Akz}$ ,
- die Anzahl an Versuchen pro Individuum  $AzVer$ , eine gültige Lösung zu erzeugen,
- das Abbruchkriterium in Form einer Anzahl an Generationen  $n_{kV}$ , über die keine Verbesserung mehr erreicht wurde,
- die Anzahl an Nachkommen pro Individuum  $AzNk$  und
- die Selektionskonstanten  $\delta$  und  $\epsilon$ .

Jedes Individuum beinhaltet die ARF-Matrix der Lösung  $s$ , den zugehörigen Ablaufplan, den Zielwert  $C_{max,s}$ , den Fitnesswert  $f_{C_{max,s}}$  sowie die Übernahmewahrscheinlichkeit  $\omega_s$ . Aus der Ausgangslösung wird durch Mutation die Startpopulation erzeugt.

### 8.1.3 Generationenwechsel

Die Mutation erfolgt durch Tauschen zweier Elemente in unterschiedlichen Spalten. Dabei gilt die Restriktion, dass die Mutation nur durchgeführt wird, wenn der Differenzbetrag der ausgewählten Elemente  $b_{i,k}$  kleiner oder gleich  $d_{max}$  ist. Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, werden so lange zwei andere Werte für den Tausch iterativ ausgewählt, bis eine gültige Paarung gefunden ist. Auf diese Weise erfolgt die Eingrenzung des Suchfeldes.

Um durch die Akzeptanztoleranz  $TOL_{Akz}$  nicht zu viele Lösungen zu verlieren, bekommt jedes Individuum eine festgelegte Anzahl ( $AzVer$ ) Versuche, neue Lösungen mit besserer Zielwerterfüllung zu erzeugen. Sofern keine Lösung besser ist als die Lösung vor der Mutation, wird diese ebenfalls zur Selektion übernommen. Durch die maximale Anzahl an Nachkommen ( $AzNk$ ) ist zudem festgelegt, wie viele Lösungen maximal aus einem Individuum zur Selektion weitergegeben werden.

### 8.1.4 Parameterbestimmung

Zur Bestimmung der acht Einflussfaktoren (s. Abschnitt 8.1.2) ist deren Effekt (SIEBERTZ ET AL. 2010, S. 12) auf die Lösungsgüte und die Rechenzeit zu analysieren. Hierzu erfolgt eine vollfaktorielle Versuchsplanung mit jeweils zwei Faktorstufen (vgl. KLEPPMANN 2013, S. 26) und zwei Versuchsreihen mit den o. g. Benchmarkinstanzen und einer Realisierung je Faktorstufenkombination. Die Auswahl der Faktorstufen ist in Anhang C.1.1 beschrieben.

Der vollständige Versuchsplan sowie die jeweils erreichten Versuchsergebnisse sind in den Tabellen C.3 und C.4 im Anhang aufgeführt. Da die jeweilige Benchmarkinstanz kein Einflussfaktor ist, werden die Versuchsläufe separat betrachtet. Zur Bestimmung der Einflussgrößen werden die Effekte für jeden Faktor und alle Wechselwirkungen herangezogen, die als Differenz der Mittelwerte für Lösungsgüte und Rechenzeit bei der jeweiligen Faktoreinstellung berechnet werden (s. Tabelle C.5 im Anhang). Dabei fällt auf, dass sämtliche Parameter einen gegensätzlichen Effekt auf Lösungsgüte und Rechenzeit haben, der sich nur in der Höhe unterscheidet. Es ist somit nicht möglich, die Einflussfaktoren für beide Zielgrößen zu optimieren, stattdessen ist ein Kompromiss für die Höhe der Faktorstufen zu finden.

Für einen weiteren Versuch wurden ausgewählte Faktorkombinationen jeweils zehn Mal realisiert (s. Tabelle C.6 in Anhang C.1.4), um Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit des Algorithmus zu gewinnen sowie um eine Abschätzung über das Verhältnis der Faktoreffektkombination zu erhalten. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

### 8.1.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuchsläufe sind in Tabelle C.7 für die *FT10*-Instanz und in Tabelle C.8 für die *TA71*-Instanz in Anhang C.1.4) aufgeführt und nach den durchschnittlichen und geringsten Werten für Gesamtdurchlaufzeit  $C_{max}$  und Rechenzeit  $RZ$  ausgewertet. Des Weiteren ist die Standardabweichung  $\sigma$  der Werte über die zehn Versuchsläufe aufgeführt.

Alle Versuchsläufe erreichten eine Verbesserung der Durchlaufzeit  $C_{max}$ . Das Optimum in Höhe von  $C_{max}(FT10) = 930$  ZE und  $C_{max}(TA71) = 5464$  ZE wurde in keinem Versuch erreicht. Die Rechenzeit weist hingegen starke Unterschiede aus und korreliert im Allgemeinen negativ mit der Lösungsgüte.

Die aufgrund der gewählten Parameter erwarteten Ergebnisse bzgl. Ergebnisgüte und Rechenzeit sind eingetroffen. Eine große Population ( $n_{pop}$ ) verbessert den Zielwert nur geringfügig, erhöht die Rechenzeit hingegen stark (vgl. Faktoreffektkombinationen Nr. 1, Nr. 3 und Nr. 8 in Tabelle C.7). Ein wichtiger Faktor für die Lösungsgüte ist hingegen die Distanz  $d_{max}$  sowie das Abbruchkriterium  $n_{kV}$ . Es ist daher anzunehmen, dass bessere Lösungen nicht ausschließlich durch den Tausch zweier nebeneinanderliegender Werte zu erreichen sind und ein großer Teil der neuen Lösungen keine Verbesserung erzielt. Bei den Versuchsergebnissen für die *TA71*-Instanzen ist zudem die hohe Rechenzeit ( $\emptyset RZ$ ), die zur Erreichung sehr guter Zielwerte erforderlich ist, auffällig.

Als Richtlinie für die Parametrierung des Algorithmus zur Neuplanung der Auftragsreihenfolge dient der in Tabelle 8.1 dargestellte Zusammenhang für die Faktorkombinationen. Der exakte Wert ist in Abhängigkeit des Anwendungsfalls festzulegen. Als bester Kompromiss zwischen Lösungsgüte und Rechenzeit dient die unter *Empfehlung* aufgeführte Faktorkombination.

Um auch bei vielen Aufträgen und Maschinen in wenigen Minuten eine große Verbesserung des Zielwerts zu erreichen, ist eine Population mit nur wenigen Individuen erforderlich und die maximale Distanz entspricht der Anzahl der Positionen  $b_{i,k}$  in der ARF-Matrix. Das Abbruchkriterium greift erst spät, wird aber für den Einsatz in der Werkstattsteuerung um ein zeitliches Abbruchkriterium, das der maximal akzeptierten Rechenzeit entspricht, ergänzt. Die übrigen Werte sind entsprechend der dritten Zeile von Tabelle 8.1 zu wählen. Aufgrund der teilweise sehr starken Wechselwirkungen bei den Effekten  $n_{pop}$ ,



**Tab. 8.1:** Ergebnis der Effektauswertung

Kriterium	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$
Lösungsgüte	+	+	-	o	++	+	o	+
Rechenzeit	--	-	+	-	--	--	o	o
Empfehlung	-	+	-	-	+	-	o	+

++ Sehr hoher Parameterwert    -    Niedriger Parameterwert  
 + Hoher Parameterwert    --    Sehr niedriger Parameterwert  
 o Wert frei wählbar

$d_{max}$  und  $n_{kV}$  sollten diese Parameter keine extrem niedrigen oder hohen Werte annehmen.

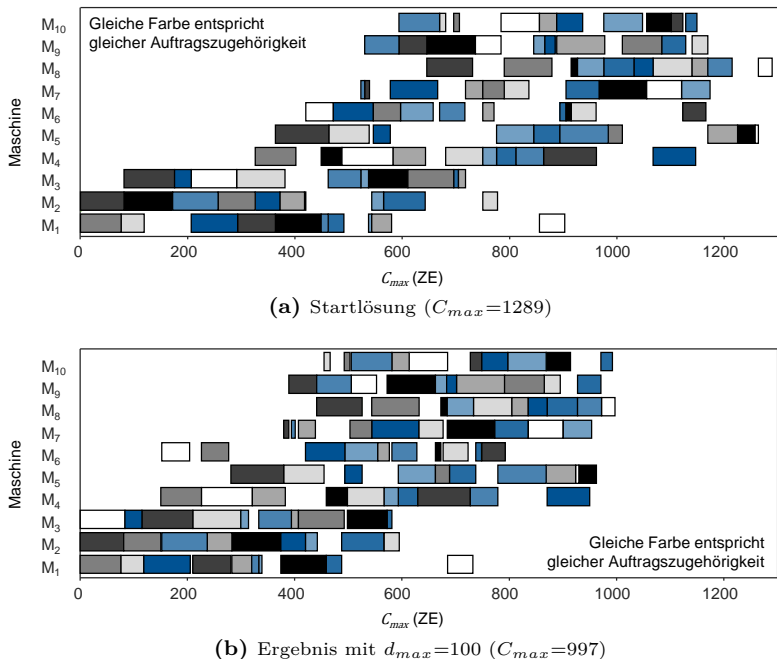
### 8.1.6 Untersuchung zur Planstabilität

In Abb. 8.1 sind die Gantt-Diagramme der Startlösung und eines Ergebnisses des Neuplanungsalgorithmus mit einer Distanz  $d_{max} = 100$  gegenübergestellt. Der Gesamtdurchlauf hat sich zwar stark verändert, bei Betrachtung einzelner Maschinen sowie deren Auftragsfolgen wird hingegen deutlich, dass sich die Reihenfolge auf einigen Maschinen (z. B. Maschinen Nr. 5 und Nr. 10) nur in sehr geringem Ausmaß geändert hat. Zudem ändert sich die Position eines Jobs in der Auftragsfolge nur wenig, z. B. auf Maschine Nr. 3 um maximal drei Plätze.

Somit sucht der Algorithmus auch bei einem hohen Distanzmaß durch die Mutation überwiegend im lokalen Umfeld der Nachbarschaft und erzielt Verbesserungen, ohne die jeweiligen Auftragsfolgen vollständig zu ändern und so das Entstehen von Planungsnervosität zu begünstigen, was in Produktionssteuerung Vorrang vor dem Erreichen des globalen Optimums hat.

### 8.1.7 Kritische Betrachtung

Die jeweils optimale Lösung der Beispielinstanzen (930 ZE für *FT10*, 5464 ZE für *TA71*) wird mit dem vorgestellten Algorithmus in keinem Versuchslauf erreicht. Algorithmen, die speziell für die Optimierung des JSSP-Problems entwickelt wurden, weisen hier eine bessere Lösungsqualität auf (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Überlegenheit dieser Algorithmen beruht überwiegend auf rekombinationsbasierter Lösungsgenerierung in Verbindung mit der Erstellung aktiver Ablaufpläne und resultiert in einer Lösungssuche, die sich weit im Lösungsraum ausbreitet und effektiv verschiedene Minima sucht.



**Abb. 8.1:** Gantt-Diagramme von Lösungen der *FT10-Instanz*

Im Gegenzug dazu ist der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus darauf ausgelegt, eine Verbesserung der Ausgangslösung über den Lösungsraum der Maßnahmenkaskaden hinaus zu erreichen, ohne den ursprünglichen Ablaufplan vollständig zu ändern. Dieses Ziel wurde, wie Abschnitt 8.1.6 zeigt, mit dem entwickelten Algorithmus erreicht. Des Weiteren liegt eine multikriterielle Kostenfunktion als Zielfunktion vor, sodass ein Scheduling zu aktiven Ablaufplänen eine Vielzahl von möglichen kostenoptimalen Lösungen ausschließen würde. Inwieweit der Algorithmus im Nachgang an die vorlagerten Maßnahmenkaskaden noch Verbesserungen erzielt, zeigt sich somit erst durch das im folgenden Abschnitt beschriebene simulationstechnische Anwendungsbeispiel.

## 8.2 Simulationstechnisches Anwendungsbeispiel

Die Erprobung des in dieser Arbeit vorgestellten Systems zur Werkstattsteuerung ist aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Trennung der Auswirkungen von bewusst veränderten und störenden Einflüssen sowie durch Einschränkungen hinsichtlich kurzfristiger Einflussgrößenveränderungen nicht im realen

Fertigungsbetrieb möglich (vgl. BÜCHEL 1968, S. 12). Zudem hätten eventuelle Fehlfunktionen gravierende Auswirkungen auf den Produktionsverlauf. Aus diesen Gründen wird zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des Steuerungssystems die Simulation<sup>59</sup> einer real existierenden Werkstattfertigung durchgeführt. Darüber hinaus sind durch die Simulation Erkenntnisse über das Systemverhalten zu erlangen sowie Kennzahlen zur Bewertung abzuleiten. Die diskrete, ereignisorientierte Ablaufsimulation<sup>60</sup> ist für diesen Zweck die geeignete Simulationsmethode.

### 8.2.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Als Anwendungsbeispiel wird die Fertigung eines mittelständischen Fahrzeugkomponentenherstellers, die sich in etwa 500 verschiedenen Varianten ausprägen, herangezogen. Aufgrund der Kombination aus großer Variantenzahl und kleinen Stückzahlen ist die Fertigung nach dem Werkstattprinzip strukturiert. Generell ist eine gerichtete Technologiefolge vorhanden, es existieren jedoch auch Rückflüsse im Materialfluss. Die Technologiefolge umfasst zunächst eine zerspanende Bearbeitung (Sägen, Drehen, Fräsen, Bohren), danach eine Wärmebehandlung (Härten, Anlassen) und im Anschluss eine Schleifbearbeitung (Rund- und Formschleifen). Abschließend werden die Erzeugnisse gewaschen und einer Qualitätsprüfung unterzogen. Da sich die Größen sowie das Anwendungsgebiet der Komponenten stark unterscheiden, weichen die meisten Produkte von der Basistechnologiefolge ab und erfordern Sonderfertigungsverfahren. Somit liegt ein ungerichteter Materialfluss vor. Einige der Fertigungsschritte werden extern mit einer Dauer von ein bis vier Wochen bearbeitet, darüber hinaus existieren manuelle Tätigkeiten. Jeder Kundenauftrag enthält zwischen fünf und 25 Arbeitsvorgänge und ist in durchschnittlich drei Lose aufgeteilt. Ein Los ist die kleinste teilbare Einheit eines Auftrags und als separater Fertigungsauftrag angelegt. Es stehen insgesamt 81 verschiedene Arbeitsstationen (Maschinen und manuelle Arbeitsplätze) zur Verfügung, die sich auf 48 Werkstätten mit jeweils einer bis fünf Maschinen aufteilen. Gefertigt wird im Dreischichtbetrieb an fünf Tagen pro Woche.

Die Fertigungssteuerung erfolgt im Betrieb manuell durch Meister und Ferti-

---

<sup>59</sup> Gemäß VDI-RICHTLINIE 3633-1 (2014) ist Simulation das „*Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.*“

<sup>60</sup> Die Ablaufsimulation bildet das zeitliche und kapazitive Verhalten von Produktionsanlagen ab und dient dazu, das dynamische Verhalten einer Produktionsanlage hinsichtlich Kapazität und verwendeter Steuerungsstrategie abzubilden (vgl. TROSSIN 1997). Dadurch werden insbesondere komplexe Entscheidungen zu logistischen Fragestellungen unterstützt (vgl. CISEK & EFFERT 2001).

gungsplaner. Durch unvorhergesehene Störungen wird der Produktionsablauf wiederkehrend unterbrochen, sodass es zu erheblichen Terminabweichungen, langen Durchlaufzeiten sowie niedrigen Auslastungen der Maschinen kommt. Die Anwendung der adaptiven Produktionssteuerung auf das Anwendungsbeispiel sieht eine Steuerungsperiode von einem Tag vor sowie eine Überarbeitung des gesamten Produktionsplans auf Basis der Rückmeldungen zwischen zwei Steuerungsperioden, also jeweils nach 24 Stunden, vor.

### 8.2.2 Datenbasis der Simulation

Als Grundlage für die Ablaufsimulation dienen historische Plandaten aus dem ERP-System des Betriebes über einen Zeitraum von vier Monaten. Die Aufträge, die Aufteilung auf Fertigungslose<sup>61</sup> sowie die zugehörigen Arbeitsvorgänge liegen vollständig vor und sind einer Produktvariante zugeordnet. Darüber hinaus existieren Freigabetermine für die Einsteuerung der Produktion sowie die Rüstzeiten der ursprünglich geplanten Auftragsreihenfolge. Des Weiteren sind für alle Maschinen Verfügbarkeit und Mean Time To Restoration (MTTR)<sup>62</sup> bekannt, sodass deren Störverhalten nachbildbar ist.

Aufgrund von Inkonsistenzen im realen Datensatz wurden zudem fehlende Bearbeitungszeiten oder Maschinenzuordnungen von ähnlichen Aufträgen abgeleitet, um eine vollständige Datenbasis zu erhalten. Da keine Rüstmatrix existiert, wurden die vorhandenen Rüstzeiten den jeweiligen Arbeitsvorgängen zugeordnet. Für Arbeitsvorgänge, denen im Ursprungsplan keine Rüstzeiten zugeordnet sind, werden Rüstzeiten des gleichen Bauteils eines anderen Auftrags verwendet oder, falls nicht vorhanden, aus den gemittelten Rüstzeiten aller Aufträge, die auf der zugeordneten Maschine gefertigt werden, bestimmt. Auf Basis des ursprünglichen Freigabetermins erfolgten die Priorisierung der einzelnen Arbeitsschritte sowie deren Einplanung auf die Maschinen durch Vorwärtsterminierung unter Berücksichtigung aller Restriktionen. Ergebnis ist ein gültiger Initialplan mit 2.066 Aufträgen und 24.658 Arbeitsvorgängen, der sich über einen Zeitraum von vier Monaten erstreckt.

Darüber hinaus waren aufgrund von Datenschutzbestimmungen oder fehlender Erhebung keine weiteren Daten verfügbar, sodass die für das Steuerungssystem notwendigen Kosten- und Termindaten auf Basis von Expertenschätzungen näherungsweise bestimmt wurden. Die Herleitung dieser Daten wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

---

<sup>61</sup> Das Fertigungslos wird als kleinste Einheit betrachtet, eine weitere Aufteilung auf einzelne Erzeugnisse erfolgt nicht.

<sup>62</sup> Mittelwert der Wiederherstellungszeit, veraltet auch als Mean Time To Repair bezeichnet (MÜLLER 2015, S. 116). Im Kontext dieser Arbeit wird der Wert als durchschnittliche Stördauer herangezogen.

### 8.2.3 Prämissen

Im Rahmen der Ablaufsimulation sind aufgrund der hohen Komplexität des Anwendungsfalls sowie der teilweise unvollständigen Datengrundlage (s. Abschnitt 8.2.2) nachfolgende Prämissen erforderlich, um das Simulationsmodell vollständig abzubilden.

#### Werkstattbezogene Prämissen

Zur externen Bearbeitung sowie Tätigkeiten an Handarbeitsplätzen liegen keine kapazitätsbezogenen Daten vor. Eine Vergabe an Lohnfertiger wird als kapazitätsunkritisch gewertet. Da im betrachteten Unternehmen Mehrmaschinenbedienung die Regel ist, wird angenommen, dass die Mitarbeiter manuelle Tätigkeiten stets durchführen können. Somit wird bei der externen Bearbeitung und bei Handarbeitsplätzen keine Kapazitätsbetrachtung durchgeführt und eine Verfügbarkeit von 100 % angenommen.

#### Zeit- und terminbezogene Prämissen

Während ungeplanter Zeiten (Pausen, ungeplante Schichten, Wochenende) findet keine Produktion statt, sodass die Produktionssteuerung nicht aktiv ist. In der Simulation wird daher ausschließlich die Nettoarbeitszeit berücksichtigt. Darüber hinaus wird zur Komplexitätsreduktion angenommen, dass sich die Schichtmodelle der Maschinen nicht unterscheiden. Da im Rahmen der adaptiven Produktionssteuerung keine Änderungen im Schichtmodell vorgesehen sind, hat das Schichtmodell keinen Einfluss auf die Wirkung des Störmanagements.

Im Ausgangsdatensatz waren weder Planabgangstermine noch Liefertermine hinterlegt, sodass die Planabgangstermine aus dem vorhandenen Endtermin des letzten Arbeitsvorgangs hergeleitet wurden.

Um die Realitätsnähe der Simulation zu erhöhen, werden die in Form von Planzeiten vorliegenden Rüst- und Bearbeitungszeiten im Simulationslauf modifiziert, um Mikrostörungen und andere Einflüsse (z. B. Leistungsgrad und Erfahrung des Mitarbeiters) zu simulieren. Da in der Praxis eher längere als kürzere Zeiten auftreten (vgl. SCHUH ET AL. 2013) werden die geplanten Rüst- und Bearbeitungszeiten jeweils mit einer Normalverteilung gestreut, wobei ein Mittelwert von 105 % der jeweiligen Planzeit und eine Standardabweichung  $\sigma = 10\%$  des Mittelwerts angenommen werden. Die Stördauer wird durch die Werker abgeschätzt. Aufgrund deren Erfahrung entspricht die Abschätzung in der Regel der Höhe der tatsächlichen Werte, auch wenn die exakte Dauer selten übereinstimmt. Daher wird die reale Stördauer ebenfalls mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 10\%$  zur in der Planung hinterlegten Dauer gestreut.

### Kostenbezogene Prämissen

Da keine Daten zu den Kosten verfügbar waren, wurden diese in ihrer Höhe durch ein Expertengespräch mit dem Produktionsleiter bestimmt. Die Fertigungskosten werden einmalig für die Werkstätten zufallsverteilt in dem Wertebereich von 80 bis 120 € pro Stunde zugewiesen, alle Maschinen einer Werkstatt haben die gleichen Maschinenkostensätze. Die Rüstkosten betragen 120 % der Fertigungskosten aufgrund des erhöhten Material- und Personaleinsatzes, für die Leerkosten wurden 30 % der Fertigungskosten angenommen. Geplante Transporte werden nicht berechnet, Zusatztransporte werden mit einem Wert von 200 € je Transport beaufschlagt.

Die Verzugskosten bestehen analog zum in Abb. 4.4 dargestellten Verlauf aus fixen und variablen Bestandteilen. Die fixen Kosten  $K_{V0,i}$  wurden normalverteilt in dem Wertebereich von 500 € bis 5.000 € zugeordnet. Sobald ein Auftrag seinen Lieferzeitpunkt überschreitet, erhöhen sich die Verzugskosten für jeden weiteren verspäteten Tag um 10 % der fixen Verzugskosten.

### Implementierte Steuerungsmaßnahmen

Neben dem Right-/Left-Shifting zur Wiederherstellung der Gültigkeit wurde das Right-Shifting and Jumping als erste Maßnahme der für die Störungsklassen relevanten Maßnahmenkaskaden umgesetzt. Dabei werden Arbeitsvorgänge in bestehende Lücken vorgezogen, sofern diese größer als die geplante Bearbeitungszeit sind. Ein Verschieben nachfolgender Aufträge entlang der Zeitachse ist nicht vorgesehen.

Da ein Fertigungslos nicht weiter teilbar ist (vgl. Abschnitt 8.2.1), ist dessen überlappende Fertigung nicht möglich. Da die Fertigungsaufträge eines Kundenauftrags über gemeinsame Rüstzustände verfügen sowie gleich terminiert sind, können die Vorteile der Überlappung oder auch des Splittens mit den umgesetzten Maßnahmen realisiert werden.

Alternative Fertigungsverfahren existieren in dem Anwendungsfall nicht. Alternative Betriebsmittel sind in den Arbeitsplänen der Produkte nicht hinterlegt. Bei Engpassmaschinen, die in gleicher oder ähnlicher Ausprägung in unterschiedlichen Werkstätten vorkommen, wurden Alternativmaschinen hinterlegt. Auf diese Weise konnte die entsprechende Steuerungsmaßnahme ohne auftragspezifische Beschreibung der Ausweichanlagen umgesetzt werden (vgl. hierzu ARPING 1977, S. 101ff.).

### Simulation angrenzender Systeme

Im Gegensatz zur Annahme einer angrenzenden Systemwelt zur Produktionsplanung (vgl. Annahme AN1) wird für die Ablaufsimulation ausschließlich das fertigungsbegleitende Steuerungssystem umgesetzt, eine Kopplung mit

angrenzenden Systemen wie einem ERP-System zur Stammdatenhaltung oder einem MES bzw. APS-System zur Produktionsplanung erfolgt nicht. In Anlehnung an die Architektur von DIMITROV & BAUMANN (2009) erfolgen die Generierung der Fertigungsaufträge sowie die Verwaltung der Stammdaten als ERP-Substitut direkt im Werkstattmodell. Des Weiteren erfordern Simulationsversuche über mehrere Steuerungsperioden hinweg eine Nachbildung der wesentlichen Funktionen der Produktionsplanung. Dies sind insbesondere die Einplanung neu eingehender Aufträge sowie die Aktualisierung des langfristigen Produktionsplans auf Basis der Rückmeldungen im Auftragsfortschritt.

Die Simulation der Produktionsplanung erfolgt dabei durch zwei Maßnahmen. Durch vorwärtsterminiertes Einplanen der einzelnen Arbeitsvorgänge wird anhand der Starttermine im Produktionsplan der Basisdaten (s. Abschnitt 8.2.2) ein neuer Produktionsplan erstellt, der alle Aufträge im Simulationszeitraum enthält. In der Praxis bestehen bei der Produktionsplanung wesentlich mehr Randbedingungen als bei der Produktionssteuerung. Da anzunehmen ist, dass der Produktionsplan des Ausgangsdatensatzes existierende, aber unbekannte Randbedingungen berücksichtigt, wird bei der Planung die weitgehende Beibehaltung der ursprünglichen Reihenfolge angestrebt. Der neu errechnete Plan ist Basis für die Bestimmung der Plan-Abgangstermine der Aufträge  $TA_i$ . Vor Beginn der Steuerungsperiode wird aus diesem Plan ein Ausschnitt mit der doppelten Länge der Steuerungsperiode (zwei Tage) als initialer Ablaufplan  $P_{Init}$  bestimmt. Nach dem Ende der Steuerungsperiode werden die verbliebenen Arbeitsvorgänge wiederum anhand der Plan-Startdaten terminiert und somit die Basis für die folgende Steuerungsperiode geschaffen (entspricht einem Planungslauf).

#### 8.2.4 Aufbau des Simulationsmodells

Die im Folgenden beschriebenen Module der adaptiven Werkstattsteuerung sind in Abb. 8.2 mit ihren Beziehungen dargestellt.

Die Werkstattfertigung ist als Modell in der Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation umgesetzt und bildet sämtliche Werkstätten sowie die darin enthaltenen Maschinen ab. Aus dem aktuell zugrunde liegenden Ablaufplan werden die Auftragsfolgen der Maschinen sowie die Startzeitpunkte als steuerungsrelevante Eingangsdaten abgeleitet. Betriebsdaten in Form von Auftragsrückmeldungen (Beginn und Ende der Bearbeitung von Arbeitsvorgängen) sowie Maschinendaten (Störungen) werden an die übergeordnete Steuerungsebene geleitet.

Das in dieser Arbeit beschriebene Steuerungssystem wurde vollständig in Tecnomatix Plant Simulation implementiert, mit Ausnahme des in MATLAB<sup>®</sup> R2015a umgesetzten Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung. Letzterer basiert auf dem in Abschnitt 8.1 vorgestellten Softwareprototypen und wurde um den

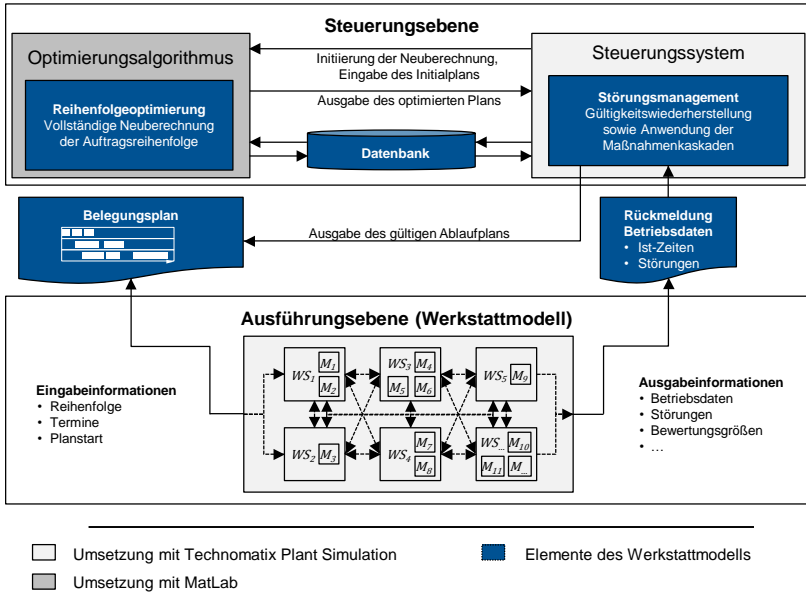


Abb. 8.2: Aufbaustruktur des Simulationsmodells

Umgang mit Rückflüssen (vgl. Abschnitt 6.4), die fehlenden Kapazitätsbetrachtung bei Handarbeitsplätzen und externen Vorgängen sowie eine kostenbasierte Fitnessfunktion (vgl. Abschnitt 6.3.2) erweitert. Beide Programme konnten über das TCP/IP<sup>63</sup>-Protokoll miteinander kommunizieren. Der Datenaustausch erfolgte über eine Microsoft-SQL-Datenbank, auf die beide Programme über eine ODBC<sup>64</sup>-Schnittstelle zugreifen.

### 8.2.5 Modellvalidierung

Nach VDI-RICHTLINIE 3633-1 (2014) erfordert die Simulation eine „Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung zwischen Modell und Original“ (Validierung). Ein Vergleich mit den Rückmeldungen aus dem realen Produktionsablauf ist nicht zielführend, da zum einen die Plan-Daten aufgrund ihrer Unvollständigkeit ergänzt werden mussten, zum anderen die Auftragssteuerung in der realen Produktion manuell erfolgt. Die der manuellen Produktionssteuerung

<sup>63</sup> Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

<sup>64</sup> Open Database Connectivity.



zugrundeliegenden Entscheidungen hängen stark vom jeweiligen Mitarbeiter ab und sind somit nicht regelbasiert modellierbar.

Die Validierung erfolgte daher durch Prüfung, ob der Produktionsdurchlauf ohne Störgrößen (Veränderung der Bearbeitungszeiten, Maschinenzeiten) dem geplanten Produktionsdurchlauf entspricht (Festwerttest nach RABE ET AL. 2008, S. 99f.). Bei den im Simulationsmodell hinterlegten Regeln wurden schrittweise überprüft, ob diese die zugehörigen Reaktionen herbeiführen.

### 8.2.6 Simulationsszenarien und Kennzahlen

Anhand der durchgeführten Simulationsexperimente ist nachzuweisen, dass das System zur adaptiven Werkstattsteuerung funktioniert und die beabsichtigten Verbesserungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Prognostizierbarkeit und Termintreue prinzipiell erreicht werden. Als Vergleichsbasis wird ein Szenario herangezogen, bei der keine produktionsbegleitende Steuerung stattfindet, sondern ausschließlich nach jedem Produktionstag eine Aktualisierung des Plans durchgeführt wird (Szenario 1). Die in der Realität existierende Meistersteuerung ist nicht abbildbar, da deren Entscheidungswege nicht nachbildbar sind und keine Aussage über die Veränderung der Zielwerte durch manuelle Eingriffe möglich ist. Darüber hinaus wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte adaptive Werkstattsteuerung vollständig, mit Ausnahme der ertungs-basierten Datenerfassung, implementiert (Szenario 3). Um weitere Erkenntnisse über die Wirkung des maßnahmenbasierten Störungsmanagements zu gewinnen, wird dies ohne die Reihenfolgeoptimierung in einem weiteren Szenario umgesetzt (Szenario 2). In Tabelle 8.2 sind die drei Simulationsszenarien gegenübergestellt.

**Tab. 8.2:** Übersicht der Simulationsszenarien

Szenario	Gültigkeitswiederherstellung	Maßnahmenkaskaden	Reihenfolgeoptimierung
Szenario 1	●	○	○
Szenario 2	●	●	○
Szenario 3	●	●	●

● ist enthalten    ○ ist nicht enthalten

Die Parametrierung des Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung erfolgt nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 8.1.5 und ist in Tabelle 8.3 dargestellt. Um die Dauer der einzelnen Simulationsexperimente auf max. 24 Stunden zu beschränken, ist die Rechenzeit auf maximal 180 Sekunden begrenzt.

**Tab. 8.3:** Parametrierung des Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung

max. RZ	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$
180 Sek.	3	10.000	5.000	25	100	3	2	0,1

Darüber hinaus wurde die Akzeptanzgrenze einer Verschlechterung wie folgt eingestellt, wobei für die Reihenfolgeoptimierung eine höhere Toleranzgrenze  $TOL_{Opt}$  geschaffen wurde, um die Häufigkeit der Aufrufe zu begrenzen.

$$TOL_S = TOL_{S_L-Opt} = 1\%$$

$$TOL_{Opt} = TOL_{Opt_L-Opt} = 2\%$$

Zur Bewertung der Simulationsexperimente wird ein Zeitraum zwischen dem 20. und 80. Simulationstag herangezogen, um Verfälschungen des Datensatzes durch das Einschwingverhalten (zu Simulationsbeginn sind alle Maschinen unbesetzt) sowie das Auslaufen der Aufträge (Auslastung sinkt gegen Ende auf allen Maschinen gegen Null) vorzubeugen.

Zur Bewertung des Steuerungsszenarios wird die Zielsetzung dieser Arbeit, die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und der Termintreue sowie der Prognostizierbarkeit des Fertigungsverlaufs, herangezogen.

Die Wirtschaftlichkeit bemisst sich ausschließlich auf Basis der durch Störungen hervorgerufenen zusätzlichen Kosten im Vergleich zum Plan, da die Erlöse nicht durch die Fertigungssteuerung beeinflusst werden können. Die Nichtnutzungs-kosten sind aus der Betrachtung herausgenommen, da sie ausschließlich zur Steuerung herangezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird zum einen die *Kostenänderung im Betrachtungszeitraum* ( $\Delta$  Gesamtkosten), zum anderen die *durchschnittliche, prozentuale Kostenabweichung pro Tag* ( $\varnothing \Delta$  Kosten/Tag) gemessen. Darüber hinaus wird die *Kosteneinhaltung* als Verhältnis der Tage, in denen die Plankosten nicht überschritten wurden zu der Gesamtzahl an Tagen im Betrachtungsraum gemessen. Die *Termintreue* bezieht sich auf das Verhältnis zwischen vorgegebenem und erreichtem Liefertermin, bezogen auf die Menge fertiggestellter Aufträge im Betrachtungsraum.

Zur Bemessung der Planstabilität werden die *durchschnittlichen Änderungen pro Tag des Ablaufplans* ( $\varnothing$  Änderungen) sowie das *Maximum an Änderungen* (Max. Änderungen) im Betrachtungszeitraum gemessen.

Weiterhin wird gemessen, welcher Anteil an Aufrufen des maßnahmenbasierten Störmanagements (*Erfolg Maßn.*) sowie des Optimierungsalgorithmus zur Neu-

berechnung der Auftragsfolge (*Erfolg Opt.*) eine Verbesserung erreicht haben sowie deren durchschnittlicher Wert ( $\varnothing$  *Verbesserung Maßn.* bzw. *Opt.*). Bei dieser Betrachtung wurden Kleinstörungen, die sich mit weniger als 100 € auf die Gesamtkosten auswirken, nicht berücksichtigt.

Außerdem wird die *durchschnittliche Durchlaufzeit* ( $\varnothing$  DLZ) der Aufträge sowie der Bestandsverlauf im Betrachtungszeitraum aufgezeichnet.

Während sich die oben aufgeführten Größen einfach messen lassen, ist die Prognostizierbarkeit der Fertigung eine abstrakte Größe, die sich vor allem auf die fortlaufende Informationsverfügbarkeit hinsichtlich der Zielerreichung bezieht. Diese ist zwar ein wichtiger Aspekt in der Produktionssteuerung, jedoch ist die Informationsverfügbarkeit nicht in Kennzahlen auszudrücken. Während der Ablaufsimulation können dem Ablaufplan  $P_{Aktuell}$  jederzeit die Start- und Endtermine aller Arbeitsvorgänge sowie die Zielgrößen entnommen werden. Diese dynamische Informationsverfügbarkeit wird exemplarisch durch eine Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs der prognostizierten reihenfolgeabhängigen Kosten mit und ohne Adaption des Ablaufplans aufgezeigt.

### 8.2.7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsversuche sind in Tabelle 8.4 aufgeführt.

**Tab. 8.4:** Versuchsergebnisse Werkstattsteuerung

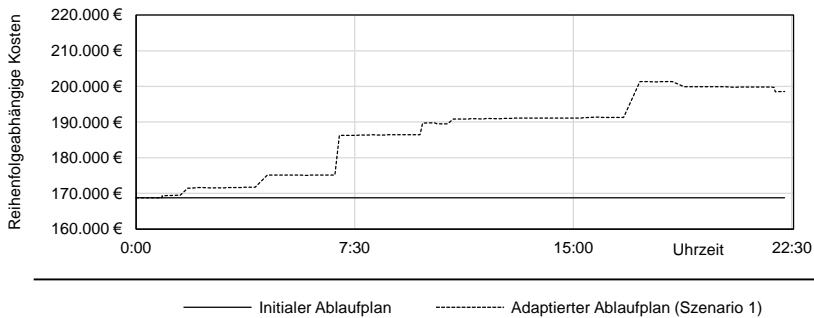
Kennzahl	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
$\Delta$ Gesamtkosten	335.406 €	99.078 €	-41.179 €
$\varnothing \Delta$ Kosten/Tag	3,82 %	1,01 %	-0,47 %
Kosteneinhaltung	23,33 %	50,77 %	56,67 %
Termintreue	95,09 %	99,76 %	99,84 %
$\varnothing$ Änderungen	0	2,23	1,57
Max. Änderungen	0	12	7
Erfolg Maßn.	-	38,57 %	51,28 %
$\varnothing$ Verbesserung Maßn.	-	164,31 €	270,12 €
Erfolg Opt.	-	-	10,00 %
$\varnothing$ Verbesserung Opt.	-	-	1.164,11 €
$\varnothing$ DLZ [Tage]	27,01	26,65	26,66

Die störungsbedingten zusätzlichen Kosten verringern sich durch die maßnahmenbasierte Steuerung (Szenario 2) um mehr als 70 %, während durch die zusätzliche Reihenfolgeoptimierung (Szenario 3) sogar die initialen Kosten

übertroffen wurden. Die Termintreue steigert sich um ca. 5% durch das vollständige Steuerungssystem, wobei der Einfluss der Reihenfolgeoptimierung an dieser Stelle sehr gering ist. Mit durchschnittlich ein bis zwei Änderungen des zugrundeliegenden Ablaufplans pro Tag kann die Planungsnervosität zudem als gering gewertet werden.

Die Durchlaufzeit wird nur in geringem Maße beeinflusst, ebenso unterscheidet sich der Bestandsverlauf (s. Abb. C.5 in Anhang C) nur minimal zwischen den unterschiedlichen Szenarien.

In Abb. 8.3 ist der Verlauf der Kosten mit und ohne Adaption des zugrundeliegenden Ablaufplans (ohne weitere Maßnahmen) für einen ausgewählten Tag dargestellt. Störungsbedingte Verschlechterungen der Zielgrößen werden bei einer permanenten Adaption des Plans an unvorhergesehene Ereignisse wesentlich früher erkannt. Auf diese Weise können deeskalierende Maßnahmen wie z. B. eine Information des Kunden oder eine Umplanung der Abläufe in nachfolgenden Bereichen wie Montage oder Versand zeitnah erfolgen.



**Abb. 8.3:** Beispielhafter Verlauf der Gesamtkosten über eine Steuerungsperiode (Szenario 1, Tag 25)

### 8.2.8 Kritische Betrachtung

Die simulationstechnische Umsetzung des entwickelten Steuerungssystems sowie die Vorversuche zur Reihenfolgeoptimierung haben gezeigt, dass die konzipierten Abläufe zur Werkstattsteuerung informationstechnisch abbildbar sind und einen Beitrag zur Zielerreichung leisten. Insbesondere die Wirtschaftlichkeit kann durch eine Reduktion der reihenfolgeabhängigen Kostenfaktoren erheblich gesteigert werden.

Die Termintreue des aufgestellten Werkstattmodells im Basisszenario liegt in einer üblichen Größenordnung für diesen Anwendungsfall (vgl. Abb. A.6 in Anhang A). Durch das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungssystem wurde

diese jedoch deutlich verbessert und erreicht mit über 99% einen für die Werkstattfertigung bisher unüblich hohen Wert.

Durch die fehlende Kenntnis über die Logik des übergeordneten Planungssystems im realen Anwendungsfall ist es möglich, dass die Steuerungslogiken denen des Planungssystems überlegen sind. Dies erklärt, warum die erreichten Zielkosten wesentlich besser ausfallen als die geplanten Kosten (Szenario 3). Es ist daher anzunehmen, dass bei einer Implementierung im realen Betrieb, bei der auch ein hoch performantes Planungssystem eingesetzt wird, die geplanten Kosten nur erreicht oder minimal unterschritten werden, eine Verbesserung in Höhe von ca. 0,5% pro Tag, wie in Szenario 3, aber unwahrscheinlich ist. Zudem ist zu erwarten, dass in der Realität die Verschlechterung im Basisszenario geringer ausfällt, da durch die Meistersteuerung ebenfalls die Auswirkungen der Störungen reduziert werden.

Innerhalb der einzelnen Maßnahmen können die Regeln zur Steuerung unterschiedlich definiert werden. Als Beispiel sei das Right-Shifting and Jumping genannt, bei dem unter anderem festzulegen ist, ob und inwieweit z. B. Folgeaufträge durch gesprungene Aufträge nach hinten verschoben werden, wie häufig der gesamte Ablaufplan nach Möglichkeiten zum Jumping zu durchsuchen ist und wann dieser Algorithmus abzubrechen ist. Ebenso ist es möglich, dass die Zielwertreichung einer Lückennutzung von verschiedenen Aufträgen zunächst verglichen wird, bevor die Entscheidung für eine Alternative fällt. Aufgrund des hohen Implementierungsaufwands sowie fehlender Kenntnis über die Fähigkeit der Zielwertverbesserung der Alternativen ohne vergleichende Versuche wurde im Rahmen dieser Arbeit für jede Maßnahme eine einfache Umsetzung gewählt. Damit wird der Effekt einer Maßnahme herbeigeführt, obgleich noch erschließbare Potenziale bestehen. Die Erfolgsquote der Maßnahmen (s. Tabelle 8.4) wird sich dabei voraussichtlich noch weiter erhöhen. Auch der Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung bietet noch Potenzial zur Verbesserung, z. B. durch Nutzung der verteilten Simulation auf mehrere Ressourcen oder durch Ausnutzung der maximal akzeptablen Rechenzeit von zehn bis fünfzehn Minuten.

### 8.3 Realisierung der ortsungs-basierten Datenerfassung

Die ortsungs-basierte Datenerfassung dient der Kopplung zwischen der Realität und dem Steuerungssystem. Um den Nachweis zu erbringen, dass aus einer Ortsveränderung des Auftrags ein Ereignis zur Änderung des Auftragsstatus bzw. zur Bestimmung von Bearbeitungsbeginn und -ende eines Arbeitsvorgangs ableitbar ist, wird das in Kapitel 7 beschriebene System in Form eines Laboraufbaus umgesetzt.

### 8.3.1 Demonstrationsszenario

Im Versuchsfeld des Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) existieren vier Werkzeugmaschinen (eine Drehmaschine und drei Fräsmaschinen) die in ein Flexibles Fertigungssystem (FFS) eingebunden sind und somit räumlich zusammen angeordnet sind. Für den Laboraufbau werden die restlichen Komponenten des FFS ignoriert und die vier Maschinen als vier Werkstätten angesehen. Als Produktionsprogramm wurden 18 Aufträge definiert, denen unterschiedliche Arbeitspläne und Liefertermine zugrunde liegen. Die Aufträge wurden im Laboraufbau durch mit Transponder versehene Kunststoffbehälter dargestellt.

Zur Lokalisierung wird ein Mojix<sup>®</sup> STAR<sup>TM</sup>-System eingesetzt. Dieses Ortungssystem ermöglicht die Lokalisierung passiver RFID-Transponder. Die herstellerseitig angegebene Genauigkeit des Systems beträgt etwa einen Meter (MOJIX 2008). Prinzipiell ist auch jedes andere Indoor-Ortungssystem mit einer ähnlichen oder höheren Genauigkeit geeignet. Das System besteht aus dem STAR<sup>TM</sup>-Receiver, der die Transponderantworten empfängt sowie den, mit jeweils vier Antennen versehenen, sog. eNodes<sup>TM</sup>, über die nacheinander die Transponder aktiviert werden, die sich in Reichweite der jeweiligen Antenne befinden. Die Koordinaten des Ortes werden anhand des empfangenen Antwortsignals des Transponders ermittelt. Für den Laboraufbau ist die Fläche durch fünf Masten, auf denen jeweils ein eNode<sup>TM</sup> mit vier Antennen angebracht ist, abgedeckt. Abb. 8.4 zeigt den Laboraufbau, wobei aufgrund der Überschneidung mit dem Versuchsstand des FFS nur die beschrifteten Elemente von Relevanz sind.

Jeder Maschine  $k$  wird die Bewegungslogik  $BL_k = (F_{B_k}, F_{F_k}, F_{A_k})$  zugeordnet, d. h. jeder Auftrag wird auf der Bereitstellfläche  $F_{B_k}$  abgestellt, auf der Fertigungsfläche  $F_{F_k}$  bearbeitet und danach auf die Abholfläche  $F_{A_k}$  gestellt. Die Bewegungslogiken der Aufträge setzen sich aus der Maschinenfolge des auftragsspezifischen Arbeitsplans zusammen (vgl. Abschnitt 7.2.4). Darüber hinaus ist eine Zusatzfläche definiert, auf der alle Aufträge zu platzieren sind, deren Bearbeitung noch nicht begonnen hat. Im realen Betrieb entspricht dies z. B. einem Ort, an dem neue Auftragslaufkarten mitsamt den Transpondern erstellt und ggf. mit dem Ausgangsmaterial verknüpft werden. Zudem werden fertiggestellte Aufträge auf der Zusatzfläche platziert, um den Abschluss deutlich von einer ungeplanten Nacharbeit zu unterscheiden. Die Modellierung der Flächen erfolgte als ortsbasierte Karte (BLM) mit einem Rasterabstand von 0,5 Metern. Die BLM des Anwendungsbeispiels ist in Abb. C.10 in Anhang C abgebildet.

Im Laboraufbau sind sämtliche im Rahmen dieser Arbeit definierten Abläufe zur ortungsbasierten Datenerfassung umgesetzt (vgl. Abb. 7.10b). Neben der

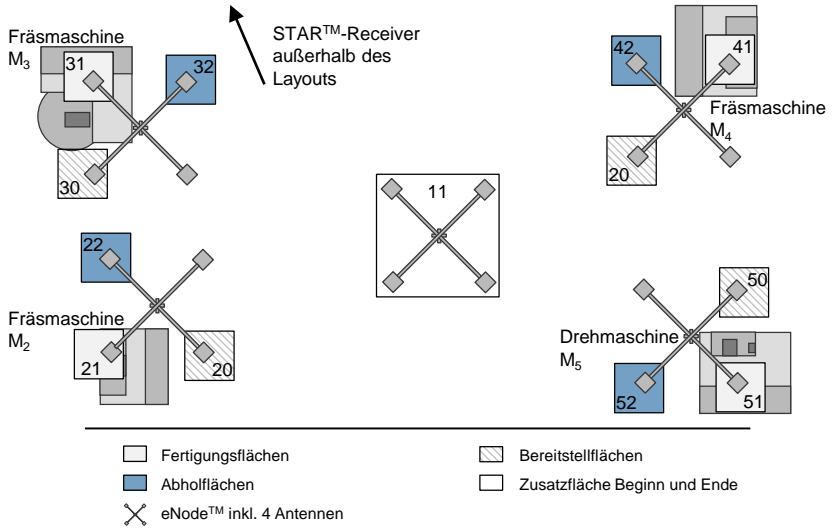


Abb. 8.4: Layout des Laboraufbaus sowie der definierten Flächen

eindeutigen Erkennung eines Flächenwechsels sowie der Sicherstellung zulässiger Bewegungen sind auch der Werkerdialog im Falle von Abweichungen sowie die Korrektur der technischen Folge realisiert worden. Eine Kopplung an das Steuerungssystem sowie die Ergänzung um Betriebs- und Maschinendaten erfolgt nicht, da im dargestellten Laboraufbau kein dynamisches Fertigungszenario vorgesehen ist. Somit beschränken sich die realen Abläufe auf das Versetzen der mit Transponder versehenen Transportbehälter der Aufträge und das entsprechende Ableiten der Start- und Endzeitpunkte.

### 8.3.2 Prototypische Umsetzung

Der Softwareprototyp der ortungsbasierten Datenerfassung wurde in MATLAB® R2015a umgesetzt. Jeder neu erfasste Datenpunkt wird in einer Matrix gespeichert und zunächst daraufhin überprüft, ob der zugehörige Auftrag zum Stillstand gekommen ist. Hierbei werden alle Koordinaten eines Auftrags herangezogen, die im Intervall von 10 Sekunden gemessen wurden. Wenn die Differenz zwischen Minimum und Maximum der Koordinaten sowohl in X- als auch in Y-Richtung geringer ist als die Auflösung der BLM (0,5 Meter), wird ein Stillstand angenommen. Im Anschluss wird die Bewegung mit den Modellen baulicher Restriktionen in X- und Y-Richtung abgeglichen und im Falle einer unzulässigen Bewegung korrigiert. Die korrekte Position ist Basis für den Abgleich der Fläche mit der zugehörigen Bewegungslogik, die als Flä-

chenvektor in einer Textdatei abgespeichert ist. Stimmt der Bereich überein, wird der entsprechende Zeitstempel abgeleitet. Falls der Bereich nicht übereinstimmt, wird der Werkdialog angestoßen, bei dem zunächst die fehlende Übereinstimmung gemeldet wird und eine Abfrage erfolgt, ob dies erwünscht ist. Im Falle einer unbewussten Verletzung der Bewegungslogik erfolgt eine Aufforderung, das Werkstück in den richtigen Bereich zu bringen. Ist die Verletzung bewusst herbeigeführt worden, besteht die Option, dies zu ignorieren, die zugehörige Maschine mit der ursprünglich vorgesehenen Maschine zu tauschen oder die Maschine bzw. den Arbeitsschritt als zusätzlichen Arbeitsschritt in den Arbeitsplan und die Bewegungslogik einzufügen.

Zur Visualisierung der erfassten Daten wurde eine HTML-basierte Ausgabemaske programmiert (s. Abb. 8.5), in der die jeweils erfassten Betriebsdaten im Arbeitsplan des zugehörigen Auftrags dargestellt werden. Zudem erfolgt im Falle einer Abweichung von der vorgesehenen Flächenfolge ein Hinweis durch ein Dialogfenster, über das zudem eine Anpassung des Arbeitsplans und der resultierenden Flächenfolge möglich ist. Ergänzend existiert für Demonstrationzwecke der Ortungsfunktionalität ein *Track & Trace*-Modus, indem die Flächenfolge eines definierten RFID-Transponders aufgenommen wird.

**Ortungsgestützte Betriebsdatenerfassung**  
Enabler für echtzeitnahe Steuerungssysteme in der manuellen Werkstattfertigung

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
Prof. Dr.-Ing. M. Zann  
Prof. Dr.-Ing. G. Rebert  
**iwb**

Betriebsdaten | Track & Trace

Auftrag 1 | Auftrag 2 | Auftrag 3 | Auftrag 4 | **Auftrag 5** | Auftrag 6 | Auftrag 7 | Auftrag 8 | Auftrag 9  
Auftrag 10 | Auftrag 11 | Auftrag 12 | Auftrag 13 | Auftrag 14 | Auftrag 15 | Auftrag 16 | Auftrag 17 | Auftrag 18

AVD-Nr.	Prozess	Werkstatt	Beginn	Ende	Angeliefert	Abgeholt
10	Produktionsstart	Eingang/Ausgang L, 11: Lager			13.11.2015 13:32:00	13.11.2015 13:33:00
20	Nut ueber Lenge L2 fraesen	Werkstatt A, 21: MCON Concept Mill 105, Fraesmaschine	13.11.2015 13:34:00	13.11.2015 13:38:00	13.11.2015 13:39:00	13.11.2015 13:40:00
30	Nut ueber Lenge L2 fraesen	Werkstatt A, 21: MCON Concept Mill 105, Fraesmaschine	13.11.2015 13:42:00	13.11.2015 13:46:00	13.11.2015 13:41:00	13.11.2015 13:47:00
40	Langlochbohrung eins und zwei auf Aussenseite	Werkstatt B, 31: MCON Concept Mill 200, Fraesmaschine	13.11.2015 13:48:00	13.11.2015 13:56:00	13.11.2015 13:48:00	13.11.2015 13:56:00
50	Langlochbohrung eins und zwei auf Aussenseite	Werkstatt B, 31: MCON Concept Mill 200, Fraesmaschine	13.11.2015 13:57:00	13.11.2015 15:08:04	13.11.2015 13:57:00	13.11.2015 15:08:36
60	Einspannen und auf Durchmesser D1 bohren	Werkstatt D, 51: MCON Concept Tum 155, Drehmaschine	13.11.2015 15:09:35	13.11.2015 15:10:00	13.11.2015 15:08:49	13.11.2015 15:10:35
70	Einspannen und auf Durchmesser D2 bohren	Werkstatt D, 51: MCON Concept Tum 155, Drehmaschine				
80	Kernloch bohren	Werkstatt C, 41: MCON Concept Mill 105, Fraesmaschine				
90	Gewinde schraeden	Werkstatt C, 41: MCON Concept Mill 105, Fraesmaschine				

**Auswahl des Modus**

**Auswahl der Aufträge**

**Dokumentation der Zeitstempel:**

- Bearbeitungsbeginn
- Bearbeitungsende
- Eintreffen am Arbeitssystem
- Verlassen des Arbeitssystem

**Auftragspezifischer Arbeitsplan**

Abb. 8.5: Bildschirmdarstellung des Softwareprototypen zur ortungsbasierten Datenerfassung

### 8.3.3 Ergebnis und kritische Betrachtung

Anhand des Laboraufbaus wurde gezeigt, dass bei vorbestimmten Flächenfolgen, eine Ableitung der Start- und Endzeitpunkte der Bearbeitung an der Maschine



sowie der Beginn von Bereitstellung und Weitertransport technisch machbar sind. Die Vorgänge innerhalb der Flächen (z. B. Rüsten und anschließende zerspanende Bearbeitung) können dagegen in dem Szenario nicht dargestellt werden, sodass im Realbetrieb Abweichungen nicht ausgeschlossen werden können. Für die praktische Umsetzung ist es daher erforderlich, die Abläufe innerhalb der Werkstatt zu standardisieren und aufgrund deren Einfluss auf die Betriebsdaten die Einhaltung des Standards sicherzustellen. Durch die hinterlegten Rastermodelle sind Änderungen der Flächenzuordnungen sowie der Flächen insgesamt mit geringem Aufwand verbunden. Der größte Einflussfaktor auf die Richtigkeit der georteten Daten ist die Prozessfähigkeit des installierten Ortungssystems. Wenn die Flächenzuordnung nicht zuverlässig gelingt, ist die Ableitung einer Betriebsdatenbasis für die Produktionssteuerung nicht möglich.

## **8.4 Technisch-wirtschaftliche Bewertung**

### **8.4.1 Technische Bewertung**

Zur technischen Bewertung der Lösung ist die Erfüllung der in Abschnitt 3.1 gestellten Anforderungen zu prüfen, die im Folgenden diskutiert werden.

Durch die Berücksichtigung der Verzugskosten in der Zielfunktion wird die Termintreue grundsätzlich berücksichtigt (AF 1). Da stets der mit Maßnahmen zur Steigerung der Termintreue verbundene Aufwand in die Zielfunktion einfließt, ist die Termintreue der Wirtschaftlichkeit untergeordnet. Dies entspricht der Zielsetzung dieser Arbeit

Durch die Einbeziehung aller reihenfolgeabhängigen Kosten wird bei jeder Steuerungsmaßnahme der entstehende Aufwand und Nutzen vollständig über alle Maschinen und Aufträge erfasst (AF 2).

Die Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufs (AF 3) wird durch die ereignisorientierte Adaption des Produktionsplans deutlich verbessert (vgl. Abb. 8.3). Die zukünftigen Start- und Endtermine basieren auf der aktuellen Situation. Aufgrund weiterer, unvorhersehbarer Ereignisse im Fertigungsverlauf sind diese unter Vorbehalt zu bewerten. Durch die Rechts- und Linksverschiebung der Aufträge bei Störungen wird eine frühere Reaktion auf nicht mehr einzuhaltende Termine (bereits während der Steuerungsperiode) im Vergleich zur ausbleibenden Aktualisierung des Ablaufplans ermöglicht.

Die globale Betrachtung des Auftragsdurchlaufs (AF 4) ist durch die prädiktiv-reaktive Steuerung auf Basis des Produktionsplans vollständig gegeben.

Bereits mit Rechenzeiten von maximal 180 Sekunden wurden durch den Optimierungsalgorithmus erhebliche Verbesserungen in der Zielfunktion erreicht.

Die Reaktionszeiten im maßnahmenbasierten Störungsmanagement haben im Anwendungsbeispiel nur wenige Sekunden betragen. In einem Expertengespräch wurden Reaktionszeiten der Produktionssteuerung in Höhe von 15 Minuten als akzeptabel genannt, sodass die Anforderung hinsichtlich kurzer Reaktionszeiten (AF 5) erfüllt ist.

Das zugrundeliegende Prozessmodell setzt sich aus Kapazitäten (Maschinen und Werkstätten) sowie aus kapazitätsbeanspruchenden Aufträgen, bestehend aus terminierten Arbeitsvorgängen, zusammen. Weiterhin werden Störungen betrachtet. Alle weiteren unvorhersehbaren Ereignisse sind nicht modelliert, können aber durch die vier Störungsklassen berücksichtigt werden, sodass die Anforderung nach einem vollständigen Prozessmodell (AF 6) hinreichend erfüllt ist.

Eine vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes (AF 7) erfolgt weder durch das maßnahmenbasierte Störungsmanagement noch durch den Neuberechnungsalgorithmus. Letzterer durchsucht die Nachbarschaft und erschließt so Lösungsräume, die durch die ausschließliche Anwendung von lokalen Maßnahmen verschlossen bleiben würden. Durch die Parametrierung gemäß der in Abschnitt 8.1.5 dargestellten Auswirkungen ist grundsätzlich eine umfassende Durchsuchung des Lösungsraums möglich, eine vollständige Durchsuchung wird hingegen nicht sichergestellt.

Die zweistufige Anpassung des Produktionsplans ermöglicht die weitgehende Vermeidung umfassender Neuberechnungen des Ablaufplans, gleichzeitig wird dessen Optimierung durchgeführt, sofern die Verschlechterung der Zielfunktion außerhalb einer Akzeptanzschwelle liegt. Durch die Einschränkung der Nachbarschaftssuche wird auch bei der Neuberechnung eine weitgehende Beibehaltung der Reihenfolge angestrebt. Anhand der Akzeptanztoleranz kann das Verhältnis zwischen Planungsnervosität und guter Zielwerterreichung (AF 8) individuell angepasst werden.

Darüber hinaus ist zu bewerten, inwieweit das System mit angenommenen Eigenschaften, deren Andersartigkeit nicht ausgeschlossen ist, umgeht. Dies sind die in Abschnitt 3.2 getroffenen Annahmen AN 3, AN 4 und AN 7,

Eine gerichtete Technologiefolge (AN 3) führt zu geringeren Auswirkungen beim Right-Shifting, da ausschließlich nachfolgende Maschinen betroffen sind, und zu ähnlichen Maschinenfolgen in den Spalten der ARF-Matrix der Reihenfolgeoptimierung. Letzteres resultiert in weniger Lösungen, die eine Reparatur benötigen und somit in einer geringeren Rechenzeit für die Optimierung. Eine nichtlineare Maschinenfolge hat einen höheren Rechenaufwand zur Folge, das Steuerungssystem kann dennoch unverändert angewendet werden.

Nichtlineare Maschinenfolgen (Widerspruch zu AN 4) entsprechen den in Abschnitt 1.4.2 aus dem Betrachtungsraum herausgenommenen Fälle von diver-

genten und konvergenten Materialflüssen (z. B. Montage von Baugruppen) und müssen für die parallel ablaufenden Arbeitsvorgänge als separate Aufträge, die über Start- und Endtermin-Randbedingungen synchronisiert sind, modelliert werden. Auf diese Weise ist das Steuerungssystem für diese Fälle aufwändiger zu modellieren und ineffizienter im Ablauf. Grundsätzlich sind nichtlineare Maschinenfolgen aber möglich.

Eine geringe Anzahl an Rückflüssen im Materialfluss (AN 7) führt zu einer effektiven Ausführung der Reihenfolgeoptimierung. Der Umgang mit Rückflüssen ist in Abschnitt 6.4 beschrieben und wurde im Anwendungsbeispiel erfolgreich umgesetzt, sodass auch bei Nicht-Eintreffen der Annahme ein erfolgreicher Einsatz möglich ist.

Aus technischer Sicht erfüllt das Steuerungssystem die gestellten Anforderungen somit in ausreichender Weise. Auch wenn vorab bei der Entwicklung ausgeschlossene Randbedingungen wie nichtlineare Maschinenfolgen, ungerichtete Technologiefolgen oder Rückflüsse im Materialfluss eintreten, ist das System unter leichten Effizienzverlusten einsetzbar. Die Entwicklung des Systems erfolgte zudem für einen deutlich abgegrenzten Untersuchungsbereich, sodass Fertigungssysteme, deren Eigenschaften und Randbedingungen stark von diesem Untersuchungsbereich abweichen, eventuell mit anderen Steuerungsverfahren effizienter zu steuern sind. Mangels standardisierter Vergleichsverfahren ist es hingegen nur schwer möglich, die Grenzen des Anwendungsbereichs aufzuzeigen. Bei kurzen Auftragsdurchlaufzeiten sowie festen Engpassressourcen eignen sich z. B. unter Umständen vollständig-reaktive Steuerungsverfahren aufgrund ihrer einfachen Steuerungsregeln besser, während bei geringen Unterschieden in den Prozessfolgen zu prüfen ist, ob die Produktion auch als schwach verkettete Fließfertigung umzusetzen ist. Bei stark variierenden Prozesszeiten, ungerichteten Materialflüssen, wechselnden Engpässen und starken Unterschieden in den Prozessfolgen der Produkte sind hingegen alle Randbedingungen, für die das hier beschriebene Steuerungssystem konzipiert wurde, erfüllt.

### 8.4.2 Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach VDI-RICHTLINIE 5600-2 (2013) lassen sich die Kosten zur Einführung und zum Betrieb eines MES-Systems, wie das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungssystem, in einmalige Kosten sowie laufende Kosten unterteilen. Bei den einmaligen Kosten entstehen Aufwendungen in der Vorbereitungsphase (z. B. Projektmanagement), der Einführungsphase (z. B. Softwarelizenzen, Programmieraufwand) sowie nach Produktivstart (z. B. Justierungen, Nachschulungen). Ergänzend sind bei einer Total Cost of Ownership (TCO)-Betrachtung laufend anfallende Kosten für den Betrieb und die Wartung des Steuerungssystems anzunehmen. Auch wenn die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit stark vom

Anwendungsfall abhängig ist, erfolgt im Folgenden eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Anlehnung an das simulierte Anwendungsbeispiel.

Die Werte für die Aufwände in Bezug auf die Software wurden durch die intensive Diskussion mit einem Experten ermittelt, der im Markt der MES als wichtiger Akteur auftritt. Dabei wurde angenommen, dass die Umsetzung als zusätzliches Modul für eine ERP-Standardplattform (z. B. als SAP-AddOn) erfolgt und nicht als eigenständiges Modul, das über Schnittstellen mit der Plattform kommuniziert.

Für die Umsetzung des in dieser Arbeit beschriebenen adaptiven Steuerungssystems, ausgenommen der ortonungsbasierten Datenerfassung, fallen für die Softwareentwicklung Investitionskosten in Höhe von 500.000 € an. Die Zielgruppe werkstattfertiger Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen KMU sind nach Angabe des Experten nicht in der Lage, diese Investitionen alleine zu tragen, sodass das System als Standardlösung über Lizenzinstallationen am Markt anzubieten wäre. Dies gilt ebenso für die ortonungsbasierte Datenerfassung (ca. 200.000 € Investitionskosten) sowie eine zugehörige Applikation für mobile Geräte (ca. 25.000 € Investitionskosten), um weitere Daten im Dialog mit dem Werker bzw. Meister anzufordern (vgl. Abschnitt 7.5). Neben den in Tabelle 8.5 aufgeführten Lizenzkosten, deren Höhe ca. 10% der Investitionskosten beträgt, fällt außerdem noch Personalaufwand zur Installation sowie zur individuellen Anpassung an. Hardwarekosten fallen für das Steuerungssystem als solches nicht an, die ortonungsbasierte Datenerfassung erfordert hingegen die Installation eines ortonungssystems. In diesem Fall wird das bereits im Laboraufbau verwendete Mojix<sup>®</sup>-STAR<sup>™</sup>-System herangezogen und entsprechende Investitionskosten für die im Anwendungsbeispiel beschriebene Werkstatt kalkuliert. Dies sind neben den Hard- und Softwarekosten auch Kosten für Trassen und Halterungen, die vor Ort beschafft werden. Weiterhin ist pro Werkstatt sowie für zwei Meisterbereiche jeweils ein mobiles Gerät für den Störungdialog vorzusehen.

Bei den laufenden Kosten (s. Tabelle 8.6) fallen für sämtliche MES-Module Wartungsaufwände (umfassen u. a. Softwareupdates) an. Aufgrund des hohen Risikos eines Softwareausfalls werden zudem die Kosten eines 24 Stunden-Supports für das Steuerungssystem berücksichtigt, mit dem im Notfall eine schnelle Fehlerbehebung gewährleistet wird. Kundenseitig ist zudem der Administrationsaufwand zu berücksichtigen. Für das ortonungssystem fällt ebenfalls Wartungsaufwand an, zudem ist für jeden Auftrag ein Transponder erforderlich, der bei passiven RFID-Transpondern am Objekt verbleibt. Bei durchschnittlich 21,3 fertiggestellten Aufträgen pro Tag ergibt dies bei 250 Arbeitstagen 5325 Transponder pro Jahr.

Auf Seiten des Nutzens bei der Einführung eines neuen MES wird nach VDI-RICHTLINIE 5600-2 (2013) zwischen quantifizierbaren und nicht quantifizier-

**Tab. 8.5:** Einmalige Kosten zur Realisierung des Steuerungssystems

<b>Sachkosten</b>	Stück	Stückkosten	Summe
MES-Modul zur adaptiven Werkstattsteuerung	1	50.000 €	50.000 €
MES-Modul zur ortungsgestützten Datenerfassung	1	20.000 €	20.000 €
Applikationssoftware zum Störungsdialog	1	5.000 €	5.000 €
Mobile Geräte für Störungsdialog	50	500 €	25.000 €
Hardware des Ortungssystems*	1	82.989 €	82.989 €
Software des Ortungssystems*	1	27.663 €	27.663 €
Installationsmaterial Ortungssystem	1	7.500 €	7.500 €
<b>Personalkosten</b>	Tag	Tagessatz	Summe
Konfiguration MES-Modul Werkstattsteuerung	2	1.000 €	2.000 €
Konfiguration MES-Modul Datenerfassung	5	1.000 €	5.000 €
Konfiguration Störungsdialog	1	1.000 €	1.000 €
Herstellung der Datenbasis	5	1.000 €	5.000 €
Kundenindividuelle Anpassung der MES-Lösung	30	1.000 €	30.000 €
Kundenindividuelle Anpassung der Datenerfassung	20	1.000 €	20.000 €
Planung, Projektierung, Inbetriebnahme Ortungssystem*	16	1.384 €	22.144 €
Elektroinstallationen Ortungssystem	20	700 €	14.000 €
Schulungskosten Werker (MES-Lieferant)	5	1.000 €	5.000 €
Interne Projektaufwände	50	650 €	32.500 €
Interne Schulungsaufwände	100	650 €	65.000 €
<b>Gesamtsumme der einmaligen Kosten</b>			<b>419.796 €</b>

\*: Diese Werte wurden vom Hersteller in US-Dollar angegeben und mit dem Wechselkurs vom 17.12.2015 in Höhe von 0,9221 € pro Dollar umgerechnet.

baren Nutzen unterschieden. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird angenommen, dass die Differenz der steuerungsrelevanten Kosten zwischen dem Basisszenario (keine adaptive Steuerung, Szenario 1) und der vollumfassenden Implementierung des in dieser Arbeit entwickelten Steuerungssystems (Szenario 3) sämtliche Nutzen umfasst. Es ist davon auszugehen, dass in der realen Umsetzung von Szenario 1 eine Steuerung durch Meister und Terminjäger erfolgt, die ebenfalls eine Reduzierung der störungsbedingten Kostensteigerungen realisieren. Da keine Werte für die im realen Betrieb realisierten Kostensteigerung während der Produktion vorliegen, wird angenommen, dass diese 50% der Kostensteigerungen aus Szenario 1 der Ablaufsimulation (vgl. Tabelle 8.4) betragen. Aufgerundet entsprechen diese einer Kostensteigerung von 168.000 € über einen Zeitraum von 60 Tagen. Zudem wird angenommen, dass bei der Implementierung des Steuerungssystems auch eine leistungsfähige Produktionsplanung vorhanden ist, sodass in Bezug auf den Initialplan keine Kostenreduzierung, wohl aber eine Kosteneinhaltung, durch die Steuerung erfolgt. Umgerechnet auf 250 Produktionstage im Jahr ergibt dies Einsparungen

**Tab. 8.6:** Laufende Kosten des Steuerungssystems

<b>Sachkosten</b>	Stück	Stückkosten	Summe
Wartung Modul Werkstattsteuerung	1	10.000 €	10.000 €
Wartung Modul ortonungsgestützten Datenerfassung	1	4.000 €	4.000 €
Wartung Applikationssoftware zum Störungdialog	1	1.000 €	1.000 €
Support Steuerungssystem (monatlich)	12	2.500 €	30.000 €
Jährlicher Transponderbedarf	5325	0,20 €	1065 €
Wartung Ortungssystem	1	10.512 €	10.512 €
<b>Personalkosten</b>	Tage	Tagessatz	Summe
Administrationskosten (kundenseitig)	2	650 €	1.300 €
Gesamtsumme der laufenden Kosten pro Jahr			57.877 €

in Höhe von  $700.000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$ .

Die Amortisationszeit für das dargestellte Beispiel berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Amortisation}} &= \frac{\text{einmalige Kosten}}{\text{Einsparungen} - \text{laufende Kosten}} \\
 &= \frac{419.796 \text{ €}}{700.000 \text{ €} - 57.877 \text{ €}} = 0,65 \text{ Jahre (164 Tage)}
 \end{aligned}$$

Das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungssystem ist, unter der Voraussetzung einer Realisierung als Systemlösung und einer angenommenen Amortisationszeit von zwei Jahren, bei einer jährlichen Vermeidung von störungsbedingten Mehrkosten<sup>65</sup> von 267.762 € (1072 € pro Tag) für eine vergleichbare Fertigung wirtschaftlich einsetzbar. Wie das dargestellte Beispiel zeigt, sind bei entsprechenden Einsparungen bereits Amortisationszeiten von weniger als einem Jahr zu erreichen.

<sup>65</sup> Entspricht der halben Summe aus einmaligen Kosten sowie den laufenden Kosten für 2 Jahre.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Dynamisierung der Produktlebenszyklen sowie der aus der Globalisierung resultierende hohe Kostendruck stellen produzierende Unternehmen vor die Herausforderung, hochindividuelle Produkte zu niedrigen Kosten und in geringen Stückzahlen effizient herzustellen. Diese Entwicklung bietet Potenzial für den Einsatz der Werkstattfertigung, die bisher hinsichtlich Effizienz und logistischer Zielerreichung anderen Fertigungsformen unterlegen ist. Neben der fehlenden Prognostizierbarkeit des Produktionsverlaufs begründet sich die niedrige Leistungsfähigkeit vor allem in ungeeigneten, meist nur lokalen Reaktionen auf Störungen und Planabweichungen sowie dem hohen Zeitverzug in der Rückmeldung der Betriebsdaten.

Eine Betrachtung bestehender Ansätze zur Werkstattsteuerung aus der Produktionstechnik sowie dem Operations Research ermöglichte die Ableitung des Handlungsbedarfs hinsichtlich einer Steuerung, die zum einen eine hohe Zielwerterreichung ermöglicht, zum anderen die Planungs nervosität durch häufiges Neuberechnen des Plans weitgehend vermeidet. Darüber hinaus wurden die Themenfelder Störungsmanagement, Zielgrößen der Werkstattsteuerung und echtzeitnahe Betriebsdatenerfassung betrachtet und der Handlungsbedarf detailliert.

Motiviert durch die Defizite bestehender Ansätze wurde in dieser Arbeit ein System zur adaptiven Werkstattsteuerung entwickelt, das die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit mit Schwerpunkt auf der Verbesserung von Termintreue und Prognostizierbarkeit der Fertigung zum Ziel hat. Grundprinzip ist die Werkstattsteuerung auf Basis eines permanent an Störereignisse adaptierten Ablaufplans. Als Zielgröße wurde die Summe aller reihenfolgeabhängigen Kosten festgelegt, da auf diese Weise eine Abwägung der einzelnen logistischen Zielgrößen im Sinne der Wirtschaftlichkeit abgeleitet.

Eine neuartige Störungsklassifizierung anhand von messbaren Ereignissen ermöglicht die zielgerichtete Einleitung von Reaktionsmaßnahmen unabhängig von der zugrundeliegenden Störungsursache, indem ausschließlich anhand der Auswirkungen auf den Ablaufplan unterschieden wird. Die Reaktionsmaßnahmen resultieren in vier unterschiedlichen Maßnahmenkaskaden, mit denen schrittweise eine Verbesserung des Zielwerts angestrebt wird.

Wenn durch Anwendung der Maßnahmenkaskaden keine zufriedenstellende Zielwertverbesserung zu erreichen ist, ermöglicht ein neuer Optimierungsalgorithmus die heuristische Suche nach besseren Auftragsreihenfolgekombinationen.

Durch eine matrixartige Repräsentation des Optimierungsproblems sowie spezifische Operatoren wird erreicht, dass sich die neuen Lösungen nur schrittweise aus der Ausgangslösung entwickeln und so eine vollständige Veränderung des zugrundeliegenden Ablaufplans weitgehend vermieden wird.

Die echtzeitnahe Bereitstellung von Betriebsdaten stellt die Grundvoraussetzung für eine adaptive Produktionssteuerung dar. Die Nutzung der ortungsbasierten Datenerfassung ermöglicht durch die Verknüpfung des auftragsbezogenen Arbeitsplans mit der zugehörigen Flächenbelegung in der Werkstatt in Form sog. Bewegungslogiken eine echtzeitnahe Ableitung der steuerungsrelevanten Zeitpunkte. Ergänzt werden diese Daten durch Maschinendaten sowie weiteren, manuell zu erfassenden Daten wie z. B. der Störungsdauer.

Das Steuerungssystem wurde als Softwareprototyp implementiert und durch die Ablaufsimulation eines Anwendungsbeispiels erprobt. Dabei wurde gezeigt, dass die adaptive Produktionssteuerung eine Verbesserung der Zielgrößen Wirtschaftlichkeit und Termintreue ermöglicht und zudem die Prognostizierbarkeit von Fertigstellungsterminen zwischen zwei Planungsläufen erheblich verbessert. Die Umsetzung der ortungsbasierten Datenerfassung erfolgte in einem Laboraufbau, mit dem die technische Machbarkeit dargelegt wurde. Abschließend wurde gezeigt, dass das entwickelte System den Anforderungen der Werkstattfertigung genügt und die Umsetzung des Systems wirtschaftlich möglich ist.

Das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungssystem umfasst im Wesentlichen autonome Abläufe zur Reaktion auf Störungen. Die mit einem solchen Steuerungssystem einhergehende geringe Einbeziehung von Fertigungsmitarbeitern (vgl. GRÜN ET AL. 2012) ist daher Ausgangspunkt weiterer Forschungsarbeiten, die eine Verbesserung der Nachvollziehbarkeit und somit der Akzeptanz von Systementscheidungen, z. B. durch entsprechende Visualisierung, zum Ziel haben.

Ein allgemeingültiger Leistungsvergleich mit anderen Ansätzen zur Werkstattsteuerung ist bisher aufgrund fehlender dynamischer Vergleichsmodelle nicht möglich. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist daher die Entwicklung von dynamischen, skalierbaren Benchmark-Modellen, anhand derer Steuerungsansätze sowie Optimierungsalgorithmen für die Werkstattfertigung erprobt und verglichen werden können.

Die Objektortung bietet neben der Ableitung steuerungsrelevanter Betriebsdaten noch weitere Potenziale, wie z. B. die Verknüpfung mit einem System zur Logistiksteuerung, um Wartezeiten auf Transporte zu verkürzen oder die Realisierung einer Suchfunktion, mittels derer die Werker gezielt den Standort von dringenden Aufträgen abfragen können. Ein weiterer Aspekt ist die Erweiterung der Bewegungslogiken um wissensbasierte Systeme, mit denen z. B. Nacharbeitstätigkeiten aus Ortsänderungen der Aufträge abgeleitet werden können.



## Literaturverzeichnis

AALST 1996

Aalst, W. M. P. v. d.: Petri net based scheduling. OR-Spektrum 18 (1996) 18, S. 219–229.

AARTS ET AL. 1994

Aarts, E. H. L.; Laarhoven, P. J. M. v.; Lenstra, J. K.; Ulder, N. J. L.: A computational study of local search shop scheduling. ORSA Journal on Computing 6 (1994) 2, S. 118–125.

ABEL 1990

Abel, D.: Petri-Netze für Ingenieure. Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer 1990.

ABELE & REINHART 2011

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

ABELE ET AL. 2009

Abele, E.; Rumpel, G.; Cachay, J.: Zukunft der Produktion in Deutschland: Entwicklungstrends und Herausforderungen für die Produktion von morgen. Industrie Management 25 (2009) 6, S. 53–58.

ACKER 2011

Acker, I. J.: Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie: Zugleich Dissertation Universität Hohenheim, 2010. Gabler Research: Produktion und Logistik. Wiesbaden: Gabler 2011.

ADAM 1993

Adam, D.: Produktions-Management. 7. Auflage. Wiesbaden: Gabler 1993.

ADAMS ET AL. 1988

Adams, J.; Balas, E.; Zawack, D.: The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling. Management Science 34 (1988) 3, S. 391–401.

AGGARWAL ET AL. 1973

Aggarwal, S. C.; Wyman, F. P.; McCarl, B. A.: An Investigation of a Cost-Based Rule for Job-Shop Scheduling. *International Journal of Production Research* 11 (1973) 3, S. 247–261.

AHRENS 1998

Ahrens, V.: *Dezentrale Produktionsplanung und -steuerung - Systemtheoretische Grundlagen und Anwendungspotentiale: Zugleich Dissertation Universität Hannover, 1997, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 472. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.*

AKTURK & GORGULU 1999

Akturk, M. S.; Gorgulu, E.: Match-up scheduling under a machine breakdown. *European Journal of Operational Research* 112 (1999) 1, S. 81–97.

ALLWEYER & SCHEER 1995

Allweyer, T.; Scheer, A.-W.: *Modellierung und Gestaltung adaptiver Geschäftsprozesse. Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Heft 115. Saarbrücken: Eigenverlag Universität des Saarlandes 1995.*

ALTHALER ET AL. 2008

Althaler, J.; Schmidt, R.; Wimmer, E.: Nur das Einfache hat Erfolg – Erst der Rückbau der IT und einfachste Gestaltung der Prozesse ermöglicht das betriebliche Optimum. *Industrie Management* 24 (2008) 3, S. 20–23.

AMELI ET AL. 2008

Ameli, M. S. J.; Arkat, J.; Barzinpour, F.: Modelling the effects of machine breakdowns in the generalized cell formation problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39 (2008) 7-8, S. 838–850.

APPELFELLER & BUCHHOLZ 2011

Appelfeller, W.; Buchholz, W.: *Supplier Relationship Management: Strategie, Organisation und IT des modernen Beschaffungsmanagements. Wiesbaden: Gabler 2011.*

APPLEGATE & COOK 1991

Applegate, D.; Cook, W.: A computational study of the job-shop scheduling problem. *ORSA Journal on Computing* 3 (1991), S. 149–156.

ARNOLD ET AL. 2008

Arnold, D.; Furmans, K.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. (Hrsg.): *Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.*

## ARPING 1977

Arping, H.: Beitrag zur rechnergestützten Fertigungsregelung mit automatischer Entscheidungshilfe im Störfall bei Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, RWTH Aachen, 1977.

## ASHOUR 1972

Ashour, S.: Sequencing Theory, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Band 69. Berlin u.a.: Springer 1972.

## BAKER 1974

Baker, K. R.: Introduction to Sequencing and Scheduling. New York: Wiley 1974.

## BALAS 1969

Balas, E.: Machine Sequencing via disjunctive graphs: an implicate enumeration algorithm. Operations Research 17 (1969) 6, S. 941–957.

## BALAS &amp; VAZACOPOULOS 1998

Balas, E.; Vazacopoulos, A.: Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling. Management Science 44 (1998) 2, S. 262–275.

## BAMBERGER 1996

Bamberger, R.: Entwicklung eines Werkzeuges zum Störungsmanagement in der Produktionsregelung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 1996, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 234. Berlin u.a.: Springer 1996.

## BAUER ET AL. 1991

Bauer, A.; Bowden, R.; Browne, J.; Duggan, J.; Lyons, G. J.: Shop Floor Control Systems: From design to implementation. London u.a.: Chapman & Hall 1991.

## BEAN 1992

Bean, J. C.: Genetics and Random Keys for Sequencing and Optimization. Technical report, University of Michigan, Ann Arbor, 1992.

## BEAN ET AL. 1991

Bean, J. C.; Birge, J. R.; Mittenthal, J.; Noon, C. E.: Matchup scheduling with multiple resources, release dates and disruptions. Operations Research 39 (1991) 3, S. 470–483.

## BECHTE 1980

Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Hannover, 1980.

BECHTE 1988

Bechte, W.: Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research* 26 (1988) 3, S. 375–395.

BECKENDORFF 1991

Beckendorff, U.: Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung; Zugleich Dissertation Universität Hannover, 1991, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 232. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.

BECKER ET AL. 1998

Becker, M.; Hellingrath, B.; Hoenen, M.; Mazzocco, C.: Simulation und Fuzzy-Logik zur Optimierung mehrstufiger Produktionsprozesse. In: Mertins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): *Erfahrungen aus der Zukunft*. Berlin: Eigenverlag IPK 1998, S. 73–81.

BEGEMANN 2005

Begemann, C.: Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung; Zugleich Dissertation Universität Hannover, 2005, Berichte aus dem IFA, Band 02/2005. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2005.

BELZ 1993

Belz, R.: Entscheidungsunterstützung auf Leitstandsebene durch wissensbasierte Simulation. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1993.

BELZ & RINGLSTETTER 1991

Belz, R.; Ringlstetter, T.: Verbindung von wissensbasierten Systemen und Simulation. In: Busch, R. (Hrsg.): *Operations Research und Wissensbasierte Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer 1991, Betriebs- und Wirtschaftsinformatik, Band 49, S. 134–164.

BENAYOUN ET AL. 1971

Benayoun, R.; Montgolfier, J.; Tergny, J.; Laritchev, O.: Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). *Mathematical Programming* 1 (1971) 1, S. 366–375.

BERTRAND & WORTMANN 1981

Bertrand, J. W.; Wortmann, J. C.: *Production Control and Information Systems for Component Manufacturing Shops*; Zugleich Dissertation Technische Universität Eindhoven, 1981. Amsterdam: Elsevier Science 1981.

## BETGE 2006

Betge, D.: Koordination in Advanced Planning and Scheduling-Systemen: Zugleich Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2005. Gabler Edition Wissenschaft, Produktion und Logistik. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006.

## BIERWIRTH 1993

Bierwirth, C.: Flowshop Scheduling mit parallelen Genetischen Algorithmen: Eine problemorientierte Analyse genetischer Suchstrategien: Zugleich Dissertation Universität Bremen, 1992. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1993.

## BIERWIRTH 1995

Bierwirth, C.: A generalized permutation approach to job shop scheduling with genetic algorithms. *OR-Spektrum* 17 (1995) 2/3, S. 87–92.

## BIERWIRTH &amp; MATTFELD 1999

Bierwirth, C.; Mattfeld, D. C.: Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms. *Evolutionary computation* 7 (1999) 1, S. 1–17.

## BIERWIRTH ET AL. 1993

Bierwirth, C.; Kopfer, H.; Mattfeld, D. C.; Utecht, T.: Genetische Algorithmen und das Problem der Maschinenbelegung. Arbeitspapier, Universität Bremen, 1993.

## BLACKSTONE ET AL. 1982

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* 20 (1982) 1, S. 27–45.

## BŁAŻEWICZ ET AL. 1996

Błażewicz, J.; Domschke, W.; Pesch, E.: The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research* 93 (1996), S. 1–33.

## BLEY &amp; JOSTOCK 1992

Bley, H.; Jostock, J.: Entwicklungstendenzen im Bereich Werkstattsteuerung. *VDI-Z* 134 (1992) 1, S. 32–38.

## BLEY ET AL. 1995

Bley, H.; Jostock, J.; Reck, K.: Order control by a hierarchical, self-organizing computer system. *Annals of the CIRP* 44 (1995) 1, S. 407–411.

BLUM & SAMPELS 2004

Blum, C.; Sampels, M.: An Ant Colony Optimization Algorithm for Shop Scheduling Problems. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 3 (2004) 3, S. 285–308.

BÖGE 1998

Böge, A. (Hrsg.): *Vieweg Lexikon Technik: Maschinenbau, Elektrotechnik, Datentechnik: Nachschlagewerk für berufliche Aus-, Fort- und Weiterbildung*. 2. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1998.

BORMANN 1978

Bormann, D.: *Störungen von Fertigungsprozessen und die Abwehr von Störungen bei Ausfällen von Arbeitskräften durch Vorhaltung von Reservepersonal: Zugleich Dissertation Universität Mainz, 1977*. Berlin: Marchal und Matzenbacher 1978.

BORNHÄUSER 2009

Bornhäuser, M.: *Reifegradbasierte Werkstattsteuerung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 2009, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 485*. Heimsheim: Jost-Jetter 2009.

BRACKEL 2009

Brackel, T. v.: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen: Zugleich Dissertation Universität Paderborn, 2008*. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler 2009.

BRANDIMARTE 1993

Brandimarte, P.: Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search. *Annals of Operations Research* 41 (1993) 3, S. 157–183.

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, J.-W.: *Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Grundlagen und Anwendungen: Zugleich Dissertation Universität Hannover, 2001, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 571*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

BREITHAUPT ET AL. 2002

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) 7, S. 625–638.

## BRIEL 2009

Briel, R. v.: Studie Turbulenz und Wandlungsfähigkeit. In: Westkämper, E.; Zahn, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, S. 271–294.

## BRINKOP &amp; NULLMEIER 1991

Brinkop, T.; Nullmeier, E.: Konkurrenz und Kooperation - Zwei Schlüsselkonzepte der Fertigungssteuerung. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 86 (1991) 12, S. 597–601.

## BRINZER 2005

Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 2005. ISW-Forschung und Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter 2005.

## BRUCKER 2001

Brucker, P.: Scheduling Algorithms. 3. Auflage. Berlin u.a.: Springer 2001.

## BRUCKER &amp; KNUST 2006

Brucker, P.; Knust, S.: Complex Scheduling. GOR Publications. Berlin u.a.: Springer 2006.

## BRÜGGEMANN 2010

Brüggemann, D.: Ein parametrisierbares Verfahren zur Änderungsplanung für den Flexible Flow Shop mit integrierter Schichtmodellauswahl. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.

## BRUNS 1993

Bruns, R.: Direct chromosome representation and advanced genetic operators for production scheduling. In: Forrest, S. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers 1993. S. 352–359.

## BRUNS 1996

Bruns, R.: Wissensbasierte Genetische Algorithmen: Zugleich Dissertation Universität Oldenburg, 1996. Sankt Augustin: Infix 1996.

## BÜCHEL 1968

Büchel, A.: Aufbau eines Simulationsmodells der Werkstättenfertigung auf der Basis eines Markov-Prozesses: Zugleich Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1968. Zürich: Juris Druck + Verlag 1968.

BÜLBÜL & KAMINSKY 2013

Bülbül, K.; Kaminsky, P.: A linear programming-based method for job shop scheduling. *Journal of Scheduling* 16 (2013) 2, S. 161–183.

BURGER 1992

Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1991, iwB-Forschungsberichte, Band 42. Berlin u.a.: Springer 1992.

BUSCH 1987

Busch, U.: Bestandsgeregelte Durchfluss-Steuerung (BGD). *CIM-Management* 3 (1987) 1, S. 18–26.

BUZACOTT & SHANTHIKUMAR 1992

Buzacott, J. A.; Shanthikumar, J. G.: A General Approach for Coordinating Production in Multiple-Cell Manufacturing Systems. *Production and Operations Management* 1 (1992) 1, S. 34–52.

CAO ET AL. 2013

Cao, W.; Jiang, P.; Sausser, J.; Deuse, J.: RFID-driven Graphical Method for Describing the Time-sensitive State and Position Changes of WIP Material Flows in a Job-Shop Floor. *Applied Mechanics and Materials* 273 (2013), S. 97–102.

CARIDI & CAVALIERI 2004

Caridi, M.; Cavalieri, S.: Multi-agent systems in production planning and control: an overview. *Production Planning & Control* 15 (2004) 2, S. 106–118.

CARLIER & PINSON 1989

Carlier, J.; Pinson, E.: An algorithm for solving the job-shop problem. *Management Science* 35 (1989) 2, S. 164–176.

CARLIER ET AL. 1984

Carlier, J.; Chretienne, P.; Girault, C.: Modelling scheduling problems with timed Petri nets. In: Ronzenberg, G. (Hrsg.): *Advances in Petri Nets 1984*. Berlin u.a.: Springer 1984, *Lecture Notes in Computer Science*, Band 188, S. 62–84.

CHENG ET AL. 1996

Cheng, R.; Gen, M.; Tsujimura, Y.: A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms - I. representation. *Computers & Industrial Engineering* 30 (1996) 4, S. 983–997.



CHONG ET AL. 2006

Chong, C. S.; Sivakumar, A. I.; Low, M. Y. H.; Gay, K. L.: A bee colony optimization algorithm to job shop scheduling. In: Perrone, L. F.; Lawson, B. G.; Liu, J.; Wieland, F. P.; Nicol, D.; Fujimoto, R. (Hrsg.): Proceedings of the 38th conference on Winter simulation, 2006. S. 1954–1961.

CHURCH & USZOY 1992

Church, L. K.; Uszoy, R.: Analysis of periodic and event driven rescheduling policies in dynamic shops. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 5 (1992) 3, S. 153–163.

CISEK & EFFERT 2001

Cisek, R.; Effert, C.: Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Virtuelle Produktion: Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug*. München: Utz 2001, iwB-Seminarberichte, Band 56, S. (1–2)–(1–18).

CLARK 1922

Clark, W.: *The Gantt Chart: A Working Tool of Management*. New York: The Ronald Press 1922.

COLLINOT & LE PAPE 1991

Collinot, A.; Le Pape, C.: Adapting the behavior of a job-shop scheduling system. *Decision Support Systems* 7 (1991) 4, S. 341–353.

COLORNI ET AL. 1992

Colorni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V.: Distributed optimization by ant colonies. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Hrsg.): *Towards a Practice of Autonomous Systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press and Bradford Books 1992, S. 134–142.

COLORNI ET AL. 1994

Colorni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Trubian, M.: Ant System for Job-Shop Scheduling. *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science* 34 (1994) 1, S. 39–53.

CONWAY ET AL. 1967

Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.: *Theory of Scheduling*. Reading: Addison-Wesley 1967.

CORSTEN & GÖSSINGER 1997

Corsten, H.; Gössinger, R.: Multiagentensystemgestützte Störungsbehandlung auf der Grundlage der opportunistischen Koordinierung, Schriften zum Produktionsmanagement, Band 14. Kaiserslautern: Eigenverlag 1997.

CORSTEN & GÖSSINGER 2012

Corsten, H.; Gössinger, R.: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 13. Auflage. München: Oldenbourg 2012.

COWLING & JOHANSSON 2002

Cowling, P.; Johansson, M.: Using real time information for effective dynamic scheduling. *European Journal of Operational Research* 139 (2002) 2, S. 230–244.

CURRY & PETERS 2005

Curry, J.; Peters, B.: Rescheduling parallel machines with stepwise increasing tardiness and machine assignment stability objectives. *International Journal of Production Research* 43 (2005), S. 3231–3246.

DANGELMAIER 2001

Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Planung vom Aufbau und Ablauf der Fertigung. VDI-Buch, 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer 2001.

DANGELMAIER & WARNECKE 1997

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

DANNINGER 2012

Danninger, M.: Ablaufplanung bei Werkstattfertigung: Ameisenalgorithmen zur Minimierung der mittleren Durchlaufzeit: Zugleich Dissertation Universität Passau, 2012. Göttingen: Sierke 2012.

DAVIS 1985

Davis, L.: Job Shop Scheduling with Genetic Algorithms. In: Grefenstette, J. (Hrsg.): *Proceedings of the first International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates 1985. S. 136–140.

DEAK ET AL. 2012

Deak, G.; Curran, K.; Condell, J.: A survey of active and passive indoor localisation systems. *Computer Communications* 35 (2012) 16, S. 1939–1954.

DECKRO ET AL. 1982

Deckro, R. F.; Hebert, J. E.; Winkofsky, E. P.: Multiple criteria job-shop scheduling. *Computers & Operations Research* 9 (1982) 4, S. 279–285.

DELL'AMICO & TRUBIAN 1993

Dell'Amico, M.; Trubian, M.: Applying tabu search to the job-shop scheduling problem. *Annals of Operations Research* 41 (1993) 3, S. 231–252.

DEMIRKOL ET AL. 1997

Demirkol, E.; Mehta, S.; Uzsoy, R.: A Computational Study of Shifting Bottleneck Procedures for Shop Scheduling Problems. *Journal of Heuristics* 3 (1997) 2, S. 111–137.

DENGLER 2014

Dengler, B.: Methode für eine flexible Materialflussanalyse und -optimierung für Unternehmen mit Werkstattfertigung; Zugleich Dissertation Leibnitz Universität Hannover, 2014, Berichte aus dem IFW, Band 11/2014. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2014.

DEUSE ET AL. 2007

Deuse, J.; Stausberg, J. R.; Wischniewski, S.: Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion: Adaption von Ganzheitlichen Produktionssystemen für den Mittelstand. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007) 5, S. 291–294.

DICKHUT 1966

Dickhut, E. O.: Zur Problematik der optimalen Fertigungsablaufplanung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, RWTH Aachen, 1966.

DIMITROV & BAUMANN 2009

Dimitrov, T.; Baumann, M.: Simulationsumgebung zur Analyse von Algorithmen für dynamische Scheduling-Probleme im Produktionsumfeld. In: Fischer, S.; Maehle, E.; Reischuk, R. (Hrsg.): *INFORMATIK 2009 - Im Focus das Leben*. Bonn: Gesellschaft für Informatik 2009, *Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings*, Band 154, S. 3645–3659.

DIN 44300-1 1988

DIN 44300-1: Informationsverarbeitung - Begriffe - Allgemeine Begriffe: Blatt 1. Berlin: Beuth 1988.

DIN 66001 1983

DIN 66001: Informationsverarbeitung: Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: Beuth 1983.

DIN IEC 60050-351 2014

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

DJABARIAN 2002

Djabarian, E.: Die strategische Gestaltung der Fertigungstiefe: Ein systemorientierter Ansatz am Beispiel der Automobilindustrie: Zugleich Dissertation Technische Universität Berlin, 2002. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002.

DOMBROWSKI 1988

Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung: Zugleich Dissertation Universität Hannover, 1988, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 159. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988.

DOMSCHKE ET AL. 1997

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte. Springer-Lehrbuch, 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1997.

DORIGO ET AL. 1996

Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A.: Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 26 (1996) 1, S. 29–41.

DORN 1995

Dorn, J.: Case-based Reactive Scheduling. In: Kerr, R. M.; Szelke, E. (Hrsg.): Artificial Intelligence in Reactive Scheduling. London u.a.: Chapman & Hall 1995, S. 32–50.

DORN ET AL. 1994

Dorn, J.; Kerr, R. M.; Thalhammer, G.: Reactive Scheduling in a Fuzzy-Temporal Framework. In: Szelke, E.; Kerr, R. M. (Hrsg.): Knowledge-Base Reactive Scheduling. Amsterdam u.a.: North-Holland 1994, IFIP Transactions B: Application in Technology, Band B-15, S. 39–55.

DORN ET AL. 1996

Dorn, J.; Girsch, M.; Skele, G.; Slany, W.: Comparison of iterative improvement techniques for schedule optimization. European Journal of Operational Research 94 (1996) 2, S. 349–361.

## DORNDORF &amp; PESCH 1993

Dorndorf, U.; Pesch, E.: Combining genetic and local search for solving the job shop scheduling problem. In: Maros, I. (Hrsg.): Symposium on Allpied Mathematical Programming and Modelling - APMOD93, Budapest, January 6-8, 1993. Budapest: Eigenverlag 1993, S. 142–149.

## DORNDORF &amp; PESCH 1995

Dorndorf, U.; Pesch, E.: Evolution-based Learning in a Job Shop Scheduling Environment. *Computers & Operations Research* 22 (1995) 1, S. 25–40.

## DRIESSEL 2011

Drießel, R.: Integrierte Steuerungsansätze für komplexe Produktionssysteme mit automatischem Transport. Dissertation, Fern-Universität Hagen, 2011.

## DROSCHA 1965

Droscha, H.: Optimierung der Produktion durch Fertigungsregelung mit datenverarbeitendem "Real-Time"-System. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 60 (1965) 5, S. 221–225.

## D'SOUZA ET AL. 2013

D'Souza, M.; Wark, T.; Karunanithi, M.; Ros, M.: Evaluation of real-time people tracking for indoor environments using ubiquitous motion sensors and limited wireless network infrastructure. *Pervasive and Mobile Computing* 9 (2013) 4, S. 498–515.

## DUECK &amp; SCHEUER 1990

Dueck, G.; Scheuer, T.: Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics* 90 (1990) 1, S. 161–175.

## EBLENKAMP 1996

Eblenkamp, M.: Planung von Produktionssystemen mit Evolutionsverfahren: Zugleich Dissertation Universität Hannover, 1996, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 396. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

## ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P. R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 2015, iwbforschungsberichte, Band 299. München: Utz 2015.

EVERS 2002

Evers, K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 2002.

EVERS 2001

Evers, S.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der pufferfreien Werkstattfertigung bei unterschiedlichen Kalendern und Kapazitäten: Zugleich Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2000. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Essen: Vulkan 2001.

EVERSHEIM 1989

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

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Störungsmanagement in der Montage: Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 1: Grundlagen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

EVERSHEIM & SCHÄFER 1980

Eversheim, W.; Schäfer, F.-W.: Planung des Flexibilitätsbedarfs von Industrieunternehmen. Die Betriebswirtschaft: DBW 40 (1980) 2, S. 229–248.

FANDEL ET AL. 1997

Fandel, G.; François, P.; Gubitz, K.-M.: PPS-Systeme und integrierte betriebliche Softwaresysteme - Grundlagen, Methoden, Marktanalyse. 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1997.

FANDEL ET AL. 2011

Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: Produktionsmanagement. Springer-Lehrbuch, 2. Auflage. Berlin: Springer 2011.

FANG ET AL. 1993

Fang, H.-L.; Ross, P.; Corne, D.: A promising genetic algorithm approach to job-shop scheduling, rescheduling and open-shop scheduling problems. In: Forrest, S. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers 1993. S. 375–382.

## FATTAHI &amp; FALLAHI 2010

Fattahi, P.; Fallahi, A.: Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2010) 2, S. 114–123.

## FELDMANN &amp; SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. *Annals of the CIRP* 50 (2001) 2, S. 489–498.

## FELDMANN 1999

Feldmann, M.: *Naturanaloge Verfahren: Metaheuristiken zur Reihenfolgeplanung*; Zugleich Dissertation Universität Bielefeld, 1998. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1999.

## FISCHÄDER 2007

Fischäder, H.: *Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen*; Zugleich Dissertation Technische Universität Ilmenau, 2005. Schriften zum Produktionsmanagement. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007.

## FISCHER 2007

Fischer, A.: *Modellbasierte Wirkbeschreibung von Prioritätsregeln*; Zugleich Dissertation Leibniz Universität Hannover, 2007, Berichte aus dem IFA, Band 02/2007. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2007.

## FISHER &amp; THOMPSON 1963

Fisher, G.; Thompson, G.: Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules. In: Muth, J. F.; Thompson, G. L.; Winters, P. R. (Hrsg.): *Industrial Scheduling*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1963, S. 225–251.

## FLEISCH ET AL. 2005

Fleisch, E.; Christ, O.; Dierkes, M.: Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: Fleisch, E. (Hrsg.): *Internet der Dinge. Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*. Berlin: Springer 2005, S. 3–37.

## FRENCH 1982

French, S.: *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-shop*. Chichester: Ellis Horwood Ltd 1982.

GANTT 1903

Gantt, H. L.: A graphical daily balance in manufacture. *ASME Transactions* 24 (1903) 1002, S. 1322–1336.

GAO ET AL. 2011

Gao, L.; Zhang, G.; Zhang, L.; Li, X.: An efficient memetic algorithm for solving the job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering* 60 (2011) 4, S. 699–705.

GARETTI & TAISCH 1999a

Garetti, M.; Taisch, M.: Advanced computing techniques in Production Planning and Control: Guest Editorial. *Production Planning & Control* 10 (1999a) 4, S. 301–304.

GARETTI & TAISCH 1999b

Garetti, M.; Taisch, M.: Neuronal networks in production planning and control. *Production Planning & Control* 10 (1999b) 4, S. 324–339.

GAREY ET AL. 1976

Garey, M. R.; Johnson, D. S.; Sethi, R. R.: The complexity of flow-shop and job-shop scheduling. *Mathematics of Operations Research* 1 (1976), S. 117–129.

GEISBERGER & BROY 2012

Geisberger, E.; Broy, M.: agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems (acatech Studie). Heidelberg u.a.: Springer 2012.

GENÇ 2015

Genç, E.: Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement: Zugleich Dissertation Technische Universität München, iwv-Forschungsberichte, Band 308. München: Utz 2015.

GERDES ET AL. 2004

Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen. Wiesbaden: Vieweg & Sohn 2004.

GIFFLER & THOMPSON 1960

Giffler, B.; Thompson, G.: Algorithms for solving production-scheduling problems. *Operations Research* 8 (1960) 4, S. 487–503.

GLASER ET AL. 1992

Glaser, H.; Geiger, W.; Rohde, V.: PPS - Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen - Konzepte - Anwendungen. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler 1992.



GLOVER 1986

Glover, F.: Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers & Operations Research* 13 (1986) 5, S. 533–549.

GLOVER 1989

Glover, F.: Tabu Search - Part 1. *ORSA Journal on Computing* 1 (1989) 3, S. 190–206.

GLOVER 1990

Glover, F.: Tabu Search - Part 2. *ORSA Journal on Computing* 2 (1990) 1, S. 4–32.

GÖHRING & LORENZ 2010

Göhring, S.; Lorenz, T.: Agentenbasierte Staplerleitsysteme. In: Günthner, W.; Hompel, M. t. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Heidelberg u.a.: Springer 2010, S. 303–318.

GOLDRATT & COX 1987

Goldratt, E. M.; Cox, J.: *Das Ziel - Höchstleistung in der Fertigung*. Hamburg: McGraw-Hill 1987.

GONCALVES & RESENDE 2011

Goncalves, J. F.; Resende, M. G. C.: A Biased Random-Key Genetic Algorithm for Job-Shop Scheduling: AT&T Labs Research Technical Report, 2011.

GONCALVES ET AL. 2005

Goncalves, J. F.; de Magalhães Mendes, J. J.; Resende, M. G. C.: A Hybrid Genetic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research* 167 (2005) 1, S. 77–95.

GRAVEL ET AL. 2002

Gravel, M.; Price, W. L.; Gagne, C.: Scheduling continuous casting of aluminum using a multiple objective ant colony optimization metaheuristic. *European Journal of Operational Research* 143 (2002) 1, S. 218–229.

GRAVES 1981

Graves, S. C.: A Review of Production Scheduling. *Operations Research* 29 (1981) 4, S. 646–675.

GRAVES 1982

Graves, S. C.: Using Lagrangian Techniques to Solve Hierarchical Production Planning Problems. *Management Science* 28 (1982) 3, S. 260–275.

GREVE 1970

Greve, J.: Störungen im Industriebetrieb. Eine klassifizierende Untersuchung der Störungen und Analyse des Störverhaltens betrieblicher Systeme unter Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1970.

GROHA 1988

Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1988, iwbforschungsberichte, Band 14. Berlin, Heidelberg: Springer 1988.

GRONAU 2014

Gronau, N.: Enterprise Resource Planning: Architektur, Funktionen und Management von ERP-Systemen. Lehrbücher Wirtschaftsinformatik, 3. Auflage. München: Oldenbourg 2014.

GRÜN ET AL. 2012

Grün, W.; Brinkop, M.; Kynast, J. F.: Renaissance der Einfachheit in der Produktionsplanung und -steuerung. *Industrie Management* 28 (2012) 1, S. 27-31.

GRUSS 2010

Gruß, R.: Schlanke Unikatfertigung: Zugleich Dissertation Technische Universität Cottbus, 2010. Beiträge zur Produktionswirtschaft. Wiesbaden: Gabler 2010.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2005.

GUO ET AL. 2006

Guo, Z. X.; Wong, W. K.; Leung, S.; Fan, J. T.; Chan, S. F.: Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry. *Computers & Industrial Engineering* 50 (2006) 3, S. 202-219.

GUTENBERG 1955

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Erster Band: Die Produktion*. 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1955.

HACKSTEIN 1988

Hackstein, R.: *Einführung in die technische Ablauforganisation*. 2. Auflage. München, Wien: Hanser 1988.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.

HANSMANN 2006

Hansmann, K.-W.: Industrielles Management. 8. Auflage. München: Oldenbourg 2006.

HANSMANN & HOECK 1997

Hansmann, K.-W.; Hoeck, M.: Production Control of a Flexible Manufacturing System in a Job Shop Environment. International Transactions in Operational Research 4 (1997) 5-6, S. 341–351.

HASAN ET AL. 2008

Hasan, S. M. K.; Sarker, R.; Cornforth, D.: GA with Priority Rules for Solving Job-Shop Scheduling Problems. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008 (IEEE World Congress on Computational Intelligence) (2008), S. 1913–1920.

HAUPT 1989

Haupt, R.: A survey of priority rule based scheduling. OR-Spektrum 11 (1989) 1, S. 3–16.

HAUPTVOGEL 2015

Hauptvogel, A.: Bewertung und Gestaltung von cyber-physischer Feinplanung: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2015. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Aachen: Apprimus 2015.

HAX & MEAL 1975

Hax, A. C.; Meal, H. C.: Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. In: Geisler, M. A. (Hrsg.): Logistics. Amsterdam: North-Holland 1975, TIMS Studies in the Management Sciences, Band 1, S. 53–69.

HEIL 1994

Heil, M.: Entstörung betrieblicher Abläufe: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1994. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1994.

HEITMANN 1999

Heitmann, K.: Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle: Zugleich Dissertation Technische Universität München, iwB-Forschungsberichte, Band 133. München: Utz 1999.

HENNING 2002

Henning, A.: Praktische Job-Shop Scheduling-Probleme. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2002.

HENSELER 1998

Henseler, H.: Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten: Zugleich Dissertation auf Universität Oldenburg, 1997, Dissertationen zur künstlichen Intelligenz, Band 180. Sankt Augustin: Infix 1998.

HERTZ & WIDMER 2003

Hertz, A.; Widmer, M.: Guidelines for the use of meta-heuristics in combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research* 151 (2003) 2, S. 247–252.

HIGUERA & MONTALVO 2007

Higuera, A. G.; Montalvo, A. C.: RFID-enhanced multi-agent based control for a machining system. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2007) 1, S. 41–61.

HILDEBRAND & MERTENS 1992

Hildebrand, R.; Mertens, P.: PPS-Controlling mit Kennzahlen und Checklisten. Berlin u.a.: Springer 1992.

HILION & PROTH 1989

Hilion, H. P.; Proth, J.-M.: Performance evaluation of job-shop systems using timed event-graphs. *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989) 1, S. 3–9.

HOFFMANN 2012

Hoffmann, H.: Der etwas andere Weg: In der Einzel- und Auftragsfertigung folgt die Integration von PDM und ERP eigenen Gesetzen. *Productivity Management* 17 (2012) 1, S. 40–42.

HOFFMANN & SCUDDER 1983

Hoffmann, T. R.; Scudder, G. D.: Priority Scheduling with Cost Considerations. *International Journal of Production Research* 21 (1983) 6, S. 881–889.

HOLLAND 1975

Holland, J.: *Adaption in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press 1975.

HOLLOWAY & NELSON 1974

Holloway, C. A.; Nelson, R. T.: Job shop scheduling with due dates and variable processing times. *Management Science* 20 (1974) 9, S. 1264–1275.

HOOKE 1995

Hooker, J. N.: Testing Heuristics: We Have It All Wrong. *Journal of Heuristics* 1 (1995) 1, S. 33–42.

HOPP & SPEARMAN 2001

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: *Factory physics - Foundation of manufacturing management*. 3. Auflage. New York: McGraw-Hill/Irwin 2001.

HÖRL 2012a

Hörl, T.: Konkrete "Absprachen" zwischen Kranen und Staplern. *Hebezeuge Fördermittel* 52 (2012a) 5, S. 242–244.

HÖRL 2012b

Hörl, T.: Warnsystem für Krane zur Kollisionsvermeidung mit ortsfesten und beweglichen Objekten im Innen- und Außenbereich. In: Schmidt, T. (Hrsg.): *20 Jahre Evolution im Kranbau*. Dresden: Eigenverlag 2012b. S. 157–167.

HUANG ET AL. 2007

Huang, G. Q.; Zhang, Y. F.; Jiang, P. Y.: RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2007) 7-8, S. 752–764.

HUSBANDS 1993

Husbands, P.: An ecosystems model for integrated production planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 6 (1993) 1-2, S. 74–86.

HUSBANDS & MILL 1991

Husbands, P.; Mill, F.: Simulated Co-Evolution as The Mechanism for Emergent Planning and Scheduling. In: Belew, R.; Booker, L. (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers 1991, S. 264–270.

HUSBANDS ET AL. 1991

Husbands, P.; Mill, F.; Warrington, S.: Genetic Algorithms, Production Plan Optimization and Scheduling. In: Schwefel, H. P.; Männer, R. (Hrsg.): *Parallel Problem Solving from Nature*. Berlin: Springer 1991, *Lecture Notes in Computer Science*, Band 496, S. 80–84.

IRASTORZA & DEANE 1974

Irastorza, J. C.; Deane, R. H.: A loading and balancing methodology for job shop control. *AIIE Transactions* 6 (1974) 4, S. 302–307.

IVENS & LAMBRECHT 1996

Ivens, P.; Lambrecht, M.: Extending the shifting bottleneck procedure to real-life applications. *European Journal of Operational Research* 90 (1996) 2, S. 252–268.

JAIN & MEERAN 1998a

Jain, A. S.; Meeran, S.: A state-of-the-art review of job-shop scheduling techniques. *Arbeitsbericht*, University of Dundee, Dundee, 1998a.

JAIN & MEERAN 1998b

Jain, A. S.; Meeran, S.: Job-shop scheduling using neural networks. *International Journal of Production Research* 36 (1998b) 5, S. 1249–1272.

JAIN & MEERAN 1999

Jain, A. S.; Meeran, S.: Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. *European Journal of Operational Research* 113 (1999) 2, S. 390–434.

JANSEN ET AL. 1993

Jansen, F. J.; Berghäuser, K.-H.; Grimm, O.; Balgheim, N.: *Rechnergestützte Betriebsorganisation: CA-Techniken in der Fertigung*. Heidelberg: Springer 1993.

JENDRALSKI 1978

Jendralski, J.: *Kapazitätsterminierung zur Bestandsregelung in der Werkstattfertigung*. Dissertation, Universität Hannover, 1978.

JODLBAUER 2008

Jodlbauer, H.: *Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung*. 2. Auflage. Wien: Springer 2008.

JONES 1973

Jones, C. H.: An Economic Evaluation of Job Shop Dispatching Rules. *Management Science* 20 (1973) 3, S. 293–307.

JOSTOCK 1994

Jostock, J.: *Aufbau eines hierarchisch organisierten, wissensunterstützten Fertigungsregelungssystems: Zugleich Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1994, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 9*. Saarbrücken: Eigenverlag 1994.

JOSTOCK & BLEY 1992

Jostock, J.; Bley, H.: Entwicklungstendenzen im Bereich Werkstattsteuerung. VDI-Z 134 (1992) 1, S. 32–38.

JOSTOCK & BLEY 1994

Jostock, J.; Bley, H.: Von der Fertigungssteuerung zur ereignisorientierten Fertigungsregelung. VDI-Z 136 (1994) 3, S. 30–35.

KANET & SRIDHARAN 1991

Kanet, J. J.; Sridharan, V.: PROGENITOR: A genetic algorithm for production scheduling. Wirtschaftsinformatik 33 (1991), S. 332–336.

KANG 1987

Kang, M.: Entwicklung eines Werkstattsteuerungssystems mit simultaner Termin- und Kapazitätsplanung; Zugleich Dissertation Technische Universität Berlin, 1987, Produktionstechnik - Berlin. Forschungsberichte für die Praxis, Band 55. München, Wien: Hanser 1987.

KÄSCHEL ET AL. 1997

Käschel, J.; Köbernik, G.; Meier, B.; Teich, T.: Ein genetischer Algorithmus für das Job Shop Problem. Arbeitsbericht 8/97, Technische Universität Chemnitz-Zwickau, Chemnitz, 1997.

KERN 2007

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. VDI-Buch, 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer 2007.

KETTNER & JENDRALSKI 1979

Kettner, H.; Jendralski, J.: Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung - Ein Sorgenkind der Produktion. VDI-Z 121 (1979) 9, S. 410–416.

KIENER ET AL. 2012

Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M.: Produktionsmanagement: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 10. Auflage. München: Oldenbourg 2012.

KIENZLE 2012

Kienzle, F.: Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten; Zugleich Dissertation Technische Universität Chemnitz, 2011, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Band 93. Eigenverlag 2012.

KILLISCH-HORN 2009

Killisch-Horn, G. v.: Erfahrungsbasierte Implementierung von APS-Systemen in der Einzel- und Kleinserienproduktion: Zugleich Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, 2009, Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, Band 04/2009. Kaiserslautern: Eigenverlag 2009.

KINGSMAN ET AL. 1989

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 (1989) 2, S. 196–206.

KINKEL & LAY 1998

Kinkel, S.; Lay, G.: Der Leistungsstand der deutschen Investitionsgüterindustrie. Wo liegen Verbesserungsmöglichkeiten für Ihren Betrieb? Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 11. Karlsruhe: Eigenverlag ISI 1998.

KIRKPATRICK ET AL. 1983

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P.: Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220 (1983) 4598, S. 671–680.

KISTNER 1993

Kistner, K.-P.: Koordinationsmechanismen in der hierarchischen Planung. In: Albach, H. (Hrsg.): *Industrielles Management*. Wiesbaden: Gabler 1993, Band 62, S. 98–119.

KISTNER & STEVEN 1990

Kistner, K.-P.; Steven, M.: *Produktionsplanung*. Heidelberg: Physica 1990.

KIZILISIK 1999

Kizilistik, Ö. B.: Predictive and reactive scheduling. Forschungsbericht, Bilkent University, Ankara, 1999.

KLAUS ET AL. 2007

Klaus, P.; Staberhofer, F.; Rothböck, M.: *Steuerung von Supply Chains: Strategien - Methoden - Beispiele*. Wiesbaden: Gabler 2007.

KLEIN 2011

Klein, M.: *Prozesssteuerung und -überwachung in der Produktionslogistik mit Hilfe eines Echtzeitortungssystems bei kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Bachelorarbeit, Hochschule Landshut, Landshut, 2011.



## KLEPPMANN 2013

Kleppmann, W.: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. Praxisreihe Qualitätswissen, 8. Auflage. München, Wien: Hanser 2013.

## KLETTI &amp; SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher: Die Perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin, Heidelberg: Springer 2011.

## KLETTI 2006

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

## KLINGBEIL &amp; WARK 2008

Klingbeil, L.; Wark, T.: A Wireless Sensor Network for Real-Time Indoor Localisation and Motion Monitoring. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2008. S. 39–50.

## KÖBERNIK 1999

Köbernik, G.: Moderne Methoden für die Fertigungssteuerung bei Werkstattfertigung: Zugleich Dissertation Technische Universität Chemnitz, 1999, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Band 3. Lohmar, Köln: Josef Eul 1999.

## KOBLASA &amp; VAVRUŠKA 2013

Koblasa, F.; Vavruška, J.: Job Shop Scheduling and Heuristic Optimization, 2013, <http://www.kvs.tul.cz/getfile/id:14811/koblasa.pdf>, aufgerufen am 21.12.2015.

## KOTSCHENREUTHER 1991

Kotschenreuther, W.: Unterstützung der Störungsbewältigung in der Produktion durch Verteilte Wissensbasierte Systeme. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1991.

## KRÄMER 1968

Krämer, E.: Das Werkstättensystem: Seine Entwicklung, seine Formen und seine Auswirkungen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1968.

## KREIMEIER 1987

Kreimeier, D.: Konfigurierbares mikrorechnergestütztes Planungshilfsmittel zur Feinsteuerung autonomer Fertigungsstrukturen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1987.

KUPEC 1991

Kupec, T.: Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1991, iwv-Forschungsberichte, Band 37. Berlin: Springer 1991.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Auflage. München, Wien: Oldenbourg 2005.

KURTH 2002

Kurth, A.: Entwicklung agentenorientierter Informationssysteme für die Fertigungsleittechnik: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2002, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 18/2002. Aachen: Shaker 2002.

LAARHOVEN & AARTS 1987

Laarhoven, P. J. M. v.; Aarts, E. H. L.: Simulated Annealing. Theory and Applications. Dordrecht u.a.: D. Reidel Publishing 1987.

LAARHOVEN ET AL. 1992

Laarhoven, P. J. M. v.; Aarts, E. H. L.; Lenstra, J. K.: Job Shop Scheduling by Simulated Annealing. Operations Research 40 (1992) 1, S. 113–125.

LAND 2004

Land, M.: Workload control in job shops, grasping the tap. Ridderkerk: Labyrinth Publications 2004.

LAND & GAALMAN 1996

Land, M.; Gaalman, G.: Workload control concepts in job shops - A critical assessment. International journal of production economics 46 (1996), S. 535–548.

LASCH & JANKER 2013

Lasch, R.; Janker, C. G.: Übungsbuch Logistik: Aufgaben und Lösungen zur quantitativen Planung in Beschaffung, Produktion und Distribution. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2013.

LAY & KINKEL 2000

Lay, G.; Kinkel, S.: Schneller, innovativer, produktiver. Entwicklung der Leistungsfähigkeit der deutschen Investitionsgüterindustrie. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 17. Karlsruhe: Eigenverlag ISI 2000.

LAY & WENGEL 1998

Lay, G.; Wengel, J.: Technikrends in der Produktionsmodernisierung. Rechnerintegration auf leisen Sohlen. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 12. Karlsruhe: Eigenverlag ISI 1998.

LE PAPE 1994

Le Pape, C.: Scheduling as Intelligent Control of Decision-Making and Constraint Propagation. In: Zweben, M.; Fox, M. S. (Hrsg.): Intelligent Scheduling. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers 1994, S. 67–98.

LEE ET AL. 1996

Lee, K. I.; Kang, M.; Park, J. H.: A Collaborative Scheduling System for Make-to-Order Manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 45 (1996) 1, S. 461–464.

LEHMANN 1992

Lehmann, F.: Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage: Ein Beitrag zur EDV-gestützten Montagesteuerung: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 1992, Berichte aus dem Werkzeugmaschinenlabor, Band 1. Aachen: Shaker 1992.

LENSTRA ET AL. 1977

Lenstra, J. K.; Rinnooy Kan, A. H. G.; Brucker, P.: Complexity of machine scheduling problems. Annals of Discrete Mathematics 1 (1977), S. 343–362.

LETMATHE 2002

Letmathe, P.: Flexible Standardisierung: Ein dezentrales Produktionsmanagement-Konzept für kleine und mittlere Unternehmen: Zugleich Habilitation Ruhr-Universität Bochum, 2002. Neue betriebswirtschaftliche Forschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2002.

LEUNG 2004

Leung, J. Y.-T. (Hrsg.): Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Boca Raton: CRC Press 2004.

LIU & DONG 1996

Liu, H.; Dong, J.: Dispatching rule selection using artificial neural networks for dynamic planning and scheduling. Journal of Intelligent Manufacturing 7 (1996) 3, S. 243–250.

LÖDDING 2001

Lödding, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung: Zugleich Dissertation Universität Hannover, 2001, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 587. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

LÖDDING 2008

Lödning, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

LÖDDING ET AL. 2003

Lödning, H.; Yu, K.-W.; Wiendahl, H.-P.: Decentralized WIP-oriented manufacturing control (DEWIP). *Production Planning & Control* 14 (2003) 1, S. 42–45.

LU ET AL. 2007

Lu, M.; Chen, W.; Shen, X.; Lam, H.-C.; Liu, J.: Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites. *Automation in Construction* 16 (2007) 5, S. 647–656.

LUCKE 2014

Lucke, D. M.: Ad hoc Informationsbeschaffung unter Einsatz kontextbezogener Systeme in der variantenreichen Serienfertigung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 2013, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 25. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2014.

LUDWIG 2001

Ludwig, B.: Management komplexer Systeme. Berlin: edition sigma 2001.

MACCARTHY 2006

Maccarthy, B.: Organizational Systems and Human Issues in Production Planning, Scheduling and Control. *International series in management science & operations research* 89 (2006), S. 59–60.

MAHAJAN 2007

Mahajan, K. R.: A Combined Simulation and Optimization Based Method for Predictive-Reactive Scheduling of Flexible Production Systems Subject to Execution Exceptions. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2007.

MANNMEUSEL 1997

Mannmeusel, T.: Dezentrale Produktionslenkung unter Nutzung verhandlungsbasierter Koordinationsformen: Zugleich Dissertation Universität Bamberg, 1997. *Forschungsbeiträge zur Wirtschaftsinformatik*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1997.

MARCZINSKI 2008

Marczinski, G.: Einsatzgebiete von ERP-, APS- und MES-Lösungen. *ERP-Management* 4 (2008) 4, S. 62–64.

MARENBACH 1987

Marenbach, H. J.: Konventionelle Systeme der Werkstattsteuerung. In: Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft e.V. (Hrsg.): PPS-Fachmann: Grundlagen, Planung, Steuerung. Eschborn, Köln: Verlag TÜV Rheinland 1987, S. Baustein S.1.1.4.1.

MÄRTENS & SAUER 1998

Märtens, A.; Sauer, J.: Ein Ablaufplanungssystem auf Basis Neuronaler Netze. In: Biethahn, J.; Hönerloh, A.; Kuhl, J.; Leisewitz, M.-C.; Nissen, V.; Tietze, M. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Anwendungen des Soft Computing. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn 1998, S. 119–216.

MÄRTENS ET AL. 2007

Märtens, A.; Elsweier, M.; Nickel, R.: Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 6, S. 471–478.

MARTIN 1998

Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1998, iwbforschungsberichte, Band 113. Berlin u.a.: Springer 1998.

MARTIN 2014

Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 9. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.

MATTFELD 1996

Mattfeld, D. C.: Evolutionary Search and the Job Shop. Heidelberg: Physica 1996.

MATTFELD & BIERWIRTH 2004

Mattfeld, D. C.; Bierwirth, C.: An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives. *European Journal of Operational Research* 155 (2004) 3, S. 616–630.

MEHRABI ET AL. 2002

Mehrabi, M. B.; Ulsoy, A. G.; Koren, Y.; Heytler, P.: Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 13 (2002) 2, S. 135–146.

MENSCH 1968

Mensch, G.: Ablaufplanung: Zugleich Dissertation Universität Bonn, 1965, Schriften des Instituts für Gesellschafts- und Wirtschaftswissenschaften der Universität Bonn, Band 8. Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag 1968.

MERTINS ET AL. 1992

Mertins, K.; Albrecht, R.; Steinberger, V.: Werkstattsteuerung - Werkstattmanagement: Wegweiser für die Einführung. Produktionswissen für die Praxis. München: Hanser 1992.

MICHALEWICZ 1996

Michalewicz, Z.: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. 3. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1996.

MIETTINEN 2008

Miettinen, K.: Introduction to Multiobjective Optimization: Noninteractive Approaches. In: Branke, J.; Kalyanmoy, D.; Miettinen, K.; Słowiński, R. (Hrsg.): Multiobjective Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, Lecture Notes in Computer Science, Band 5252, S. 1–26.

MILBERG 1992

Milberg, J.: Werkzeugmaschinen - Grundlagen: Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen, Steuerungen. Berlin, Heidelberg: Springer 1992.

MILBERG & BURGER 1991

Milberg, J.; Burger, C.: Produktionsregelung als Erweiterung der Produktionsplanung und -steuerung. CIM-Management (1991) 2, S. 60–64.

MILBERG ET AL. 1992

Milberg, J.; Burger, C.; Zetlmayer, H.: Flexible Regelung der Produktion mit entscheidungsunterstützenden Systemen. VDI-Z 134 (1992) 5, S. 140–145.

MIYASHITA & SYCARA 1995

Miyashita, K.; Sycara, K. P.: CABINS: a framework of knowledge acquisition and iterative revision for schedule improvement and reactive repair. Artificial Intelligence 76 (1995) 1-2, S. 377–426.

MOHR 1987

Mohr, H.: DV-gestützte Werkstattsteuerung mit BDE. In: Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft e.V. (Hrsg.): PPS-Fachmann: Grundlagen, Planung, Steuerung. Eschborn, Köln: Verlag TÜV Rheinland 1987, S. Baustein S.1.1.4.4.

MOJIX 2008

Mojix: Mojix eLocation™ Solution (Broschüre). Mojix®, Inc. 2008.

## MÖNCH 2006

Mönch, L.: Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme: Zugleich Habilitation Technische Universität Ilmenau, 2005. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006.

## MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S. R. T.: Agent-Based Systems for Manufacturing. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 2, S. 697–720.

## MORATORI ET AL. 2008

Moratori, P.; Petrovic, S.; Vázquez, A.: Match-Up Strategies for Job Shop Rescheduling. In: Nguyen, N. T.; Borzemski, L.; Grzech, A.; Ali, M. (Hrsg.): *New Frontiers in Applied Artificial Intelligence*. Berlin u.a.: Springer 2008, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Band 5027, S. 119–128.

## MOREIRA &amp; ALVES 2009

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) 10, S. 2805–2821.

## MOROFF 1992

Moroff, G.: *Werkzeugmaschinen in der industriellen Produktion: Kennzeichnung, Planung und Einsatz moderner Fertigungskonzepte aus betriebswirtschaftlicher Sicht*. Dissertation, Universität Mannheim, Mannheim, 1992.

## MÜLLER ET AL. 2009

Müller, E.; Riedl, R.; Kienzle, F.: Schlanke Fertigungssteuerung in der Werkstattfertigung. *PPS Management* 14 (2009) 2, S. 13–16.

## MÜLLER 2015

Müller, J. R.: *Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015.

## MÜLLER-MERBACH 1970

Müller-Merbach, H.: *Optimale Reihenfolgen, Ökonometrie und Unternehmensforschung*, Band 15. Berlin, New York: Springer 1970.

## MÜNZBERG &amp; NYHUIS 2009

Münzberg, B.; Nyhuis, P.: Individual Configuration of Production Control to Suit Requirements. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* (Hrsg.): *International Conference on Manufacturing and Industrial Engineering (Indonesia, 24.-27.11.2009)*. Eigenverlag (Online) 2009, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol. 3 No. 11, Band 3, S. 43–48.

MUTH ET AL. 1963

Muth, J. F.; Thompson, G. L.; Winters, P. R. (Hrsg.): Industrial Scheduling. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1963.

NAKANO & YAMADA 1991

Nakano, R.; Yamada, T.: Conventional Genetic Algorithm for Job Shop Problems. In: Belew, R.; Booker, L. (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers 1991, S. 474–479.

NEBL 2004

Nebel, T.: Produktionswirtschaft. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre, 5. Auflage. München: Oldenbourg 2004.

NEIDHARDT 2007

Neidhardt, U.: Einsatz von Prioritätsregeln zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen: Zugleich Dissertation Universität Rostock, 2007. Schriftenreihe des Institutes für Produktionswirtschaft der Universität Rostock. Aachen: Shaker 2007.

NESTLER 1969

Nestler, H.: Methoden zur Bestimmung der Raumgröße und Raumausnutzung von Fertigungswerkstätten. Dissertation, Universität Hannover, 1969.

NEWMAN & MAFFEI 1999

Newman, W. R.; Maffei, M. J.: Managing the job shop: simulating the effects of flexibility, order release mechanisms and sequencing rules. Integrated Manufacturing Systems 10 (1999) 5, S. 266–275.

NIEHUES ET AL. 2012

Niehues, M.; Nissen, F.; Reinhart, G.: Moderne Werkstattfertigung: Effiziente Fertigung hochvarianter Produkte durch Echtzeit-Ortung und adaptive Steuerung der Auftragsreihenfolge mittels bionischer Algorithmen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 12, S. 892–896.

NIEHUES ET AL. 2015

Niehues, M.; Buschle, F.; Reinhart, G.: Adaptive Job-shop Control Based on Permanent Order Sequencing. Procedia CIRP. Proceedings of the 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14 33 (2015), S. 127–132.



## NIETSCH ET AL. 1991

Nietsch, M.; Nietsch, T.; Rautenstrauch, C.; Rinschede, M.; Siedentopf, J.: Anforderungen an einen elektronischen Leitstand - Ergebnisse einer Untersuchung in mittelständischen Industriebetrieben. Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering 40 (1991) 6, S. 266–272.

## NISSING &amp; VIRNICH 1982

Nissing, T.; Virnich, M.: EDV-gestützte Werkstattsteuerung - Wunschkind und Stiefkind zugleich. AV - Die Arbeitsvorbereitung 19 (1982) 3, S. 74–78.

## NITTKA 1996

Nittka, F.: Koordinierung der Fertigung in teilautonomen Bereichen durch Bestandsregelung und Simulation: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 1995, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 371. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

## NOWICKI &amp; SMUTNICKI 1996

Nowicki, E.; Smutnicki, C.: A fast taboo search algorithm for the job shop problem. Management Science 42 (1996) 6, S. 797–813.

## NOWICKI &amp; SMUTNICKI 2005

Nowicki, E.; Smutnicki, C.: An advanced tabu search algorithm for the job shop problem. Journal of Scheduling 8 (2005) 2, S. 145–159.

## NYHUIS &amp; WIENDAHL 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. VDI-Buch, 3. Auflage. Berlin u.a.: Springer Vieweg 2012.

## OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 2012, iwB-Forschungsberichte, Band 265. München: Utz 2012.

## QUELHADI &amp; PETROVIC 2009

Ouelhadi, D.; Petrovic, S.: Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. Journal of Scheduling 12 (2009) 4, S. 417–431.

## OVACIK &amp; UZSOY 1992

Ovacik, I. M.; Uzsoy, R.: A shifting bottleneck algorithm for scheduling semiconductor testing operations. Journal of Electronics Manufacturing 2 (1992) 3, S. 119–134.

PATIG 2001

Patig, S.: Flexible Produktionsfeinplanung mit Hilfe von Planungsschritten: Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion: Zugleich Dissertation Universität Magdeburg, 2001. Frankfurt a. M.: Peter Lang 2001.

PAULIK 1984

Paulik, R.: Kostenorientierte Reihenfolgeplanung in der Werkstattfertigung: Eine Simulationsstudie, Regensburger Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung, Band 6. Bern, Stuttgart: Haupt 1984.

PAWELLEK 2007

Pawellek, G.: Produktionslogistik: Planung - Steuerung - Controlling. München: Hanser 2007.

PELLENZ 2011

Pellenz, J.: Aktive Sensorik für autonome mobile Systeme: Zugleich Dissertation Universität Koblenz, 2011. Uelvesbuell: Der Andere Verlag 2011.

PETERMANN 1996

Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung: Zugleich Dissertation Leibnitz Universität Hannover, 1995, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren, Band 193. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

PETRI 1962

Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1962.

PHANDEN ET AL. 2012

Phanden, R. K.; Jain, A.; Verma, R.: A genetic algorithm-based approach for job shop scheduling. *Journal of Manufacturing Technology Management* 23 (2012) 7, S. 937–946.

PIELCZYK 1996

Pielczyk, A.: Maschinenbau: auf dem Weg zur Losgröße 1. In: Little, A. D. (Hrsg.): *Management im vernetzten Unternehmen*. Wiesbaden: Gabler 1996, S. 77–90.

PIGGIN & BRANDT 2006

Piggin, R.; Brandt, D.: Wireless ethernet for industrial applications. *Assembly Automation* 26 (2006) 3, S. 205–215.

PIPHO 1979

Pipho, K.-H.: Verfahren zur Ermittlung der Zwischenlagerfläche bei Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Hannover, 1979.

PLOSSL 1973

Plossl, G. W.: Manufacturing Control. The Last Frontier for Profits. Reston, VA: Reston Publishing 1973.

POHLHEIM 2000

Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer 2000.

PRITSCHOW & BRINZER 2002

Pritschow, G.; Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 12, S. 627–632.

PRITSCHOW & WIENDAHL 1995

Pritschow, G.; Wiendahl, H.-P.: Application of Control Theory for Production Logistics - Results of a Joint Project. Annals of the CIRP 44 (1995) 1, S. 421–424.

RABE ET AL. 2008

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

RAHMAN 2013

Rahman, A. A. A.: Approach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow: Zugleich Dissertation Technische Universität Berlin, 2013. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013.

RAZAVI & MOSELHI 2012

Razavi, S. N.; Moselhi, O.: GPS-less indoor construction location sensing. Automation in Construction 28 (2012), S. 128–136.

RECHENBERG 1972

Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Problematika, Band 15. Stuttgart: Frommann 1972.

REFA-VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V.  
1985

REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.: Methodenlehre der Planung und Steuerung Teil 3: Zeitermittlung, Terminierung, Erstellen von Arbeitsunterlagen, Werkstattsteuerung. 4. Auflage. München: Hanser 1985.

REFA-VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V.  
1991a

REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.: Planung und Steuerung - Teil 3. Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Hanser 1991a.

REFA-VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V.  
1991b

REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.: Planung und Steuerung - Teil 2. Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Hanser 1991b.

REINHART & SIMON 1995

Reinhart, G.; Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störmanagement. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 90 (1995) 3, S. 86–89.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Niehues, M.; Ostgathe, M.: Adaptive, Location-based Shop Floor Control. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability: Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada, 2-5 October 2011. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 482–487.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Niehues, M.; Batzner, J.; Welter, E.: Werkstattsteuerung mittels Ressourcenkonten: Hochvariante Produkte mittels bestandsreguliertem Verfahren effizient und engpassarm fertigen. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 4, S. 331–335.

REINISCH 1974

Reinisch, K.: Kybernetische Grundlagen und Beschreibung kontinuierlicher Systeme. Berlin (Ost): VEB Verlag Technik 1974.

REITHOFER 1987

Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1987, iwv-Forschungsberichte, Band 10. Berlin, Heidelberg: Springer 1987.

REMPP 2003

Rempp, B.: Regelungstechnische Untersuchung durchsatzgeregelter Produktionssysteme: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 2003, ISW-Forschung und Praxis, Band 146. Heimsheim: Jost-Jetter 2003.

RENNER 1991

Renner, A.: Kostenorientierte Produktionssteuerung: Anwendung der Prozesskostenrechnung in einem datenbankgestütztem Modell für flexibel automatisierte Produktionssysteme: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 1991. Controlling-Praxis. München: Vahlen 1991.

RIEPER 1979

Rieper, B.: Hierarchische betriebliche Systeme, Beiträge zur industriellen Unternehmensforschung, Band 8. Wiesbaden: Gabler 1979.

RINGLSTETTER 1992

Ringlstetter, T.: Verbindung von Simulation und Wissensbasierten Systemen zur kurzfristigen Störungsbewältigung in der Fertigungssteuerung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1992.

RIPP 2011

Ripp, S.: Komplexitätsbeherrschung der dispositiven Produktionslogistik durch permanente Synchronisation: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2011. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Aachen: Apprimus 2011.

RIXEN 1997

Rixen, I.: Maschinenbelegungsplanung mit Evolutionären Algorithmen: Zugleich Dissertation Universität Bremen, 1997. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1997.

RIXEN & KOPFER 1994

Rixen, I.; Kopfer, H.: Ein Genetischer Algorithmus für das Job-Shop-Scheduling-Problem. Fachbericht, Universität Bremen, Bremen, 1994.

ROCKSTROH 1982

Rockstroh, W.: Die technologische Betriebsprojektierung. Band 2: Projektierung von Fertigungswerkstätten. 2. Auflage. Berlin (Ost): VEB Verlag Technik 1982.

ROSCHMANN & JUNGHANNS 1993

Roschmann, K.; Junghanns, J.: Zeit- und Betriebsdatenerfassung. Anforderungen und Lösungskonzepte. Landsberg/Lech: verlag moderne industrie 1993.

ROSE 1989

Rose, H.: Computergestützte Störungsbewältigung beim Durchlauf von Produktionsaufträgen unter besonderer Berücksichtigung wissensbasierter Elemente. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1989.

ROY & SUSSMANN 1964

Roy, D.; Sussmann: Les problèmes d'ordonnancement avec contraintes disjonctives. SEMA, Note D.S. 9b (1964).

SABUNCOUGLU & BAYIZ 2000

Sabuncouglu, I.; Bayiz, M.: Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment. European Journal of Operational Research 126 (2000), S. 567–586.

SACKERMANN & DEUSE 2010

Sackermann, R.; Deuse, J.: Zeitermittlung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Wissensbasierte Zeitermittlungsmethode unter den besonderen Randbedingungen unscharfer Informationen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 728–732.

SAMES & BÜDENBENDER 1998

Sames, G.; Büdenbender, W.: Aachener PPS-Modell: Das morphologische Merkmalsschema. Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen, Sonderdruck 4/90, 7. Auflage. Aachen: Eigenverlag 1998.

SAUER 2002

Sauer, J.: Multi-Site Scheduling - Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen. Habilitation, Universität Oldenburg, Oldenburg, 2002.

SAWIK 2007

Sawik, T.: Multi-objective master production scheduling in make-to-order manufacturing. International Journal of Production Research 45 (2007) 12, S. 2629–2653.

SCHÄFER 1980

Schäfer, F.-W.: System zur Planung und Nutzung der Flexibilität in der Fertigung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1980.

## SCHALLER 2004

Schaller, J.: Single machine scheduling with early and quadratic tardy penalties. *Computers & Industrial Engineering* 46 (2004) 3, S. 511–532.

## SCHEER 1997

Scheer, A.-W.: *Wirtschaftsinformatik - Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse*. 7. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1997.

## SCHERER 1998

Scherer, E.: *Shop Floor Control - A Systems Perspective: From Deterministic Models towards Agile Operations Management*. Berlin u.a.: Springer 1998.

## SCHMID 2006

Schmid, S.: Advanced Planning and Scheduling. *PPS Management* 11 (2006) 3, S. 52–63.

## SCHMIDT 2008

Schmidt, M.: *Produktionsplanung und -steuerung*. In: Arnold, D.; Furmans, K.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 323–343.

## SCHMITT 1989

Schmitt, E.: *Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur: Ein Ansatz zur rechnerunterstützten Maschinenbelegungsplanung: Zugleich Dissertation Universität Karlsruhe, 1989, Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, Band 20*. Karlsruhe: Eigenverlag 1989.

## SCHNEEWEISS 1988

Schneeweiss, C.: *Zur Bewältigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung*. In: Lücke, W. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftliche Steuerungs- und Kontrollprobleme*. Wiesbaden: Gabler 1988, S. 285–302.

## SCHNEIDER ET AL. 2005

Schneider, H.; Buzacott, J. A.; Rücker, T.: *Operative Produktionsplanung und -steuerung. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre*. München: Oldenbourg 2005.

## SCHNEIDER &amp; Ettl 2012

Schneider, M.; Ettl, M.: *Lean Factory Design: Ganzheitliche Fabrikgestaltung und -betrieb nach Lean-Kriterien*. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107 (2012) 1-2, S. 61–66.

SCHNEIDER ET AL. 2013

Schneider, M.; Ettl, M.; Schubel, A.: PPS-Systeme: Die „wahren“ Bedürfnisse von KMUs: Das Landshuter Produktionssystem: CLean Production – Teil 2. *Industrie Management* 29 (2013) 2, S. 43–48.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 2, S. 712–729.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2013

Scholz-Reiter, B.; Hildebrandt, T.; Tan, Y.: Effective and efficient scheduling of dynamic job shops - Combining the shifting bottleneck procedure with variable neighbourhood search. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2013) 1, S. 423–426.

SCHOMBURG 1980

Schomburg, E.: Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1980.

SCHÖNEBURG ET AL. 1994

Schöneburg, E.; Heinzmann, F.; Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. 1. Auflage. Paris, Reading: Addison-Wesley 1994.

SCHÖNSLEBEN 2001

Schönsleben, P.: Integrales Informationsmanagement: Informationssysteme für Geschäftsprozesse : Management, Modellierung, Lebenszyklus und Technologie. 2. Auflage. Berlin: Springer 2001.

SCHÖNSLEBEN 2011

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 6. Auflage. Heidelberg u.a.: Springer 2011.

SCHUH & LASSEN 2006

Schuh, G.; Lassen, S.: Aachener PPS-Modell: Funktionen. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin u.a.: Springer 2006, S. 195–292.



## SCHUH &amp; ROESGEN 2006

Schuh, G.; Roesgen, R.: Aachener PPS-Modell: Aufgaben. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin u.a.: Springer 2006, S. 28–80.

## SCHUH &amp; STICH 2013

Schuh, G.; Stich, V.: Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen: Eigenverlag FIR e.V. 2013.

## SCHUH &amp; WESTKÄMPER 2006

Schuh, G.; Westkämper, E.: Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau: Stand - Potenziale - Trends. Studienergebnisse des FIR, IPA, WZL. Aachen, Stuttgart: Eigenverlag 2006.

## SCHUH ET AL. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.: High Resolution Production Management. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 1, S. 439–442.

## SCHUH ET AL. 2013

Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: A Cyber-Physical Production Management. In: Prabhu, V.; Taisch, M.; Kiritsis, D. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains*. Heidelberg u.a.: Springer 2013, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Band 414, S. 477–484.

## SCHUH ET AL. 2014a

Schuh, G.; Potente, T.; Hauptvogel, A.: Methodology for the evaluation of forecast reliability of production planning systems. *Procedia CIRP. Variety Management in Manufacturing — Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (2014a)* 17, S. 469–474.

## SCHUH ET AL. 2014b

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*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014b, S. 277–295.

## SCHUH ET AL. 2015

Schuh, G.; Nyhuis, P.; Reuter, C.; Hauptvogel, A.; Schmitz, S.; Nywlt, J.; Brambring, F.; Schulte, F.; Hansen, J.: Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0: Gemeinsame Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 4, S. 200–203.

SCHULTE 1995

Schulte, J.: Werkstattsteuerung mit genetischen Algorithmen und simulativer Bewertung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 1995, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 220. Berlin u.a.: Springer 1995.

SCHULTZ & MERTENS 2000

Schultz, J.; Mertens, P.: Untersuchung wissensbasierter und weiterer ausgewählter Ansätze zur Unterstützung der Produktionsfeinplanung - ein Methodenvergleich. *Wirtschaftsinformatik* 42 (2000) 1, S. 56–65.

SCHULTZ ET AL. 1995

Schultz, J.; Weigelt, M.; Mertens, P.: Verfahren für die rechnergestützte Produktionsfeinplanung. *Wirtschaftsinformatik* 37 (1995) 6, S. 594–608.

SCHUSTER 2003

Schuster, J.: No-Wait Job-Shop-Scheduling: Komplexität und Local Search. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2003.

SCHÜTTE ET AL. 1999

Schütte, R.; Siedentopf, J.; Zelewski, S.: Koordinationsprobleme in Produktionplanungs- und -steuerungskonzepten. In: Corsten, H., Friedl, B. (Hrsg.): Einführung in das Produktionscontrolling. München: Vahlen 1999, S. 141–187.

SCHUTTEN 1998

Schutten, J. M. J.: Practical job shop scheduling. *Annals of Operations Research* 83 (1998), S. 161–177.

SCHWAB 2014

Schwab, A. J.: Managementwissen für Ingenieure: Wie funktionieren Unternehmen? VDI-Buch, 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014.

SCHWARTZ 2004

Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2003. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik. Aachen: Shaker 2004.

SHA & HSU 2006

Sha, D. Y.; Hsu, C.-Y.: A hybrid particle swarm optimization for job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering* 51 (2006) 4, S. 791–808.

## SHEIKH 2003

Sheikh, K.: Manufacturing Resource Planning (MRP II): With an introduction to ERP, SCM, and CRM. New York: McGraw-Hill 2003.

## SIEBERTZ ET AL. 2010

Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE). VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

## SIEDENTOPF 1995

Siedentopf, J.: An Efficient Scheduling Algorithm Based upon Threshold Accepting. Bericht Nr. 16. Diss., Universität Leipzig, Leipzig, 1995.

## SIEGEL 1973

Siegel, T.: Das Reihenfolgeproblem der Maschinenbelegungsplanung und ein graphischer Branch-and-Bound-Algorithmus zu seiner Lösung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1973.

## SIMON 1995

Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1994, iwb-Forschungsberichte, Band 85. Berlin u.a.: Springer 1995.

## SIVANANDAM &amp; DEEPA 2008

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N.: Introduction to Genetic Algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

## SONNENSCHN 1998

Sonnenschein, K.: Feinplanung in flexiblen Fertigungssystemen: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 1998, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 98/23. Aachen: Shaker 1998.

## SPECHT &amp; STEFANSKA 2009

Specht, D.; Stefanska, R.: Lean Production als Produktionskonzept für die Unikat- und Einzelfertigung. In: Specht, D. (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 31–42.

## SPENGLER ET AL. 1996

Spengler, T.; Stremper, M.; Rentz, O.: Produktionssteuerung mit Betriebskennlinien und belastungsorientierter Auftragsfreigabe. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 91 (1996) 7-8, S. 348–351.

SPRAVE 1999

Sprave, J.: Ein einheitliches Modell für Populationsstrukturen in Evolutionsären Algorithmen. Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1999.

STADTLER 2015

Stadtler, H.: Production Planning and Scheduling. In: Stadtler, H.; Kilger, C.; Meyr, H. (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin u.a.: Springer 2015, S. 195–211.

STEININGER 2007

Steininger, P.: Eine Methode zur Reihenfolgeplanung bei Mehrprodukt-Fertigungssystemen: Zugleich Dissertation Universität Karlsruhe, 2006, Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 38. Aachen: Shaker 2007.

STEINRÜCKE 2007

Steinrücke, M.: Termin-, Kapazitäts- und Materialflussplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung: Zugleich Habilitation Fern-Universität Hagen, 2006, Neue betriebswirtschaftliche Forschung, Band 355. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007.

STORER ET AL. 1992a

Storer, R.; Wu, D.; Vaccari, R.: New Search Spaces for Sequencing Problems with Application to Job Shop Scheduling. Management Science 38 (1992a) 10, S. 1495–1509.

STORER ET AL. 1992b

Storer, R. H.; Wu, S. D.; Vaccari, R.: Local search in problem and heuristic space for job-shop scheduling genetic algorithm. In: Fandel, G.; Gullledge, T.; Jones, A. (Hrsg.): New Directions for Operations Research in Manufacturing: Proceedings of a Joint US/German Conference, Gaithersburg, Maryland, USA, July 30–31, 1991. Berlin, Heidelberg: Springer 1992b, S. 149–160.

STOSIK 2005

Stosik, D.: Mehrzielorientierte Ablaufplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung: Zugleich Dissertation Universität Münster, 2005, Advances in information systems and management science, Band 17. Berlin: Logos 2005.

STRACK 1987

Strack, M.: Organisatorische Gestaltung einer zentralen Werkstattsteuerung: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 1986, Forschung für die Praxis, Band 10. Berlin u.a.: Springer 1987.

STRICKER ET AL. 2014

Stricker, N.; Loeper, O.; Lanza, G.: Bewertungskriterien von Rescheduling-Produktionsplänen: Identifikation verursachter Mehraufwände aufgrund von Umplanungen. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 4, S. 230–233.

SUN & XUE 2001

Sun, J.; Xue, D.: A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources. *Computers in Industry* 46 (2001) 2, S. 189–207.

SURI 1998

Suri, R.: *Quick response manufacturing: A companywide approach to reducing lead times*. Portland, OR: Productivity Press 1998.

SYCARA & MIYASHITA 1994

Sycara, K. P.; Miyashita, K.: Adaptive Schedule Repair. In: Szelke, E.; Kerr, R. M. (Hrsg.): *Knowledge-Base Reactive Scheduling*. Amsterdam u.a.: North-Holland 1994, IFIP Transactions B: Application in Technology, Band B-15, S. 107–124.

SYSWERDA 1991

Syswerda, G.: Scheduling optimization using genetic algorithms. In: Davis, L. (Hrsg.): *Handbook of Genetic Algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold 1991, S. 332–349.

SZELKE & MONOSTORI 1999

Szelke, E.; Monostori, L.: Reactive Scheduling in Real Time Production Control. In: Brandimarte, P.; Villa, A. (Hrsg.): *Modeling Manufacturing Systems*. Berlin u.a.: Springer 1999, S. 65–113.

TAILLARD 1993

Taillard, E.: Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 64 (1993) 2, S. 278–285.

TAILLARD 1994

Taillard, E.: Parallel taboo search technique for the jobshop scheduling problem. *ORSA Journal on Computing* 6 (1994) 2, S. 108–117.

TAILLARD 2012

Taillard, E.: Scheduling instances, 2012, <http://mistic.heig-vd.ch/taillard/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>, aufgerufen am 21.12.2015.

TAMILARASI & ANANTHA KUMAR 2010

Tamilarasi, A.; Anantha kumar, T.: An enhanced genetic algorithm with simulated annealing for job-shop scheduling. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2 (2010) 1, S. 144–151.

TANG ET AL. 2011

Tang, J.; Zhang, G.; Lin, B.; Zhang, B.: A Hybrid Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problem. *Procedia Engineering* 15 (2011), S. 3678–3683.

TANGOUR & SAAD 2006

Tangour, F.; Saad, I.: Multiobjective Optimization Scheduling Problems by Pareto-optimality in Agro-alimentary Workshop. *International Journal of Computers, Communications & Control* 1 (2006) 3, S. 71–83.

TEICH 1998

Teich, T.: Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren: Zugleich Dissertation Technische Universität Chemnitz, 1998, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Band 1. Lohmar, Köln: Josef Eul 1998.

TEICH 2003

Teich, T.: Extended Value Chain Management - ein Konzept zur Koordination von Wertschöpfungsnetzten: Zugleich Habilitation Technische Universität Chemnitz, 2002. Chemnitz: Verlag der GUC 2003.

TEIZER ET AL. 2013

Teizer, J.; Cheng, T.; Fang, Y.: Location tracking and data visualization technology to advance construction ironworkers' education and training in safety and productivity. *Automation in Construction* 35 (2013), S. 53–68.

TESORIERO ET AL. 2010

Tesoriero, R.; Tebar, R.; Gallud, J. A.; Lozano, M. D.; Penichet, V. M. R.: Improving location awareness in indoor spaces using RFID technology. *Expert Systems with Applications* 37 (2010) 1, S. 894–989.

## THEBUD 2007

Thebud, N.: Fertigungsnahe industrielle Dienstleistungen: Rationalisierungspotenzial für die Produktionsorganisation in KMU: Zugleich Dissertation Universität Rostock, 2007. Schriftenreihe des Institutes für Produktionswirtschaft der Universität Rostock. Aachen: Shaker 2007.

## THIESSE &amp; FLEISCH 2008

Thiesse, F.; Fleisch, E.: On the value of location to lot scheduling in complex manufacturing processes. *International journal of production economics* 112 (2008) 2, S. 532–547.

## THOMAS 2014

Thomas, C.: Leistungssteigerung der Produktionssteuerung durch die Einbeziehung von sozio-technischen Systemeffekten: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2014, Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 13/2014. Aachen: Apprimus 2014.

## THOME 1990

Thome, H. G.: Simulationsgestützte Planung und Betrieb von flexiblen Produktionssystemen im Regelkreis. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1990.

## THRUN ET AL. 2005

Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D.: *Probabilistic Robotics*. Cambridge, MA: MIT Press 2005.

## TÖNSHOFF &amp; GLÖCKNER 1992

Tönshoff, H. K.; Glöckner, M.: Chaos und Produktionsprozesse. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 87 (1992) 6, S. 336–339.

## TÖNSHOFF &amp; SIELMANN 1997

Tönshoff, H. K.; Sielmann, M.: Reduzierung des Rückmeldeaufwands in der Fertigung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 92 (1997) 1/2, S. 42–44.

## TROSSIN 1997

Trossin, H.-J.: Einsatzmöglichkeiten der Simulationstechnik. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): *Simulation: Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte*. München: Utz 1997, iwv-Seminarberichte, Band 4, S. 1–10.

## UBISENSE 2011

Ubisense: Exakte Werkzeugsteuerung mit RTLS: Innovative Fertigungslösung für die Automobilindustrie. *VDI-Z* 153 (2011) 7/8, S. 60.

VAESSENS ET AL. 1996

Vaessens, R. M. J.; Aarts, E. H. L.; Lenstra, J. K.: Job shop scheduling by local search. *INFORMS Journal on Computing* 8 (1996) 3, S. 302–317.

VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008

Vahrenkamp, R.; Siepermann, C.: *Produktionsmanagement*. 6. Auflage. München: Oldenbourg 2008.

VAQUEZ & WHITLEY 2000

Vaquez, M.; Whitley, D.: A Comparison of Genetic Algorithms for the Static Job Shop Scheduling Problem. *Lecture Notes in Computer Science* 1917 (2000) Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI, S. 303–312.

VDI-RICHTLINIE 3258-1 1962

VDI-Richtlinie 3258-1: *Kostenrechnung mit Maschinenstundensätze - Begriffe, Beschreibungen, Zusammenhänge*: Blatt 1. Berlin: Beuth 1962.

VDI-RICHTLINIE 3633-1 2014

VDI-Richtlinie 3633-1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*: Grundlagen: Blatt 1, Band ICS 03.100.10. Berlin: Beuth 2014.

VDI-RICHTLINIE 5600-1 2007

VDI-Richtlinie 5600-1: *Fertigungsmanagementsysteme Manufacturing Execution Systems (MES)*: Blatt 1, Band ICS 35.240.50. Berlin: Beuth 2007.

VDI-RICHTLINIE 5600-2 2013

VDI-Richtlinie 5600-2: *Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES): Wirtschaftlichkeit*: Blatt 2, Band ICS 35.240.50. Berlin: Beuth 2013.

VDMA 2012

VDMA: *Maschinenbau in Zahl und Bild*. Frankfurt a. M.: Eigenverlag 2012.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. 1983

Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Produktionstechnik; REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983.

VIEIRA ET AL. 2003

Vieira, G. E.; Herrmann, J. W.; Lin, E.: Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. *Journal of Scheduling* 6 (2003) 1, S. 39–62.



## VOGEL ET AL. 2002

Vogel, A.; Fischer, M.; Jähn, H.; Teich, T.: Real-World Shop Floor Scheduling by Ant Colony Optimization. In: Dorigo, M.; Di Caro, G.; Sampels, M. (Hrsg.): Ant Algorithms: Proceedings. Berlin u.a.: Springer 2002, Lecture Notes in Computer Science, Band 2463, S. 268–273.

## WARNECKE 1989

Warnecke, H.-J.: Die Produktion als Regelkreis, Überlegungen zu seiner Gestaltung. Automatisierungstechnische Praxis atp 31 (1989) 3, S. 110–115.

## WEICKER 2015

Weicker, K.: Evolutionäre Algorithmen. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.

## WEIDNER 1992

Weidner, D.: Engpassorientierte Fertigungssteuerung - Eine Untersuchung über die in Optimized Production Technology implementierten Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung: Zugleich Dissertation Universität Kiel, 1992, Europäische Hochschulschriften. Reihe V: Volks- und Betriebswirtschaft, Band 1304. Frankfurt a. M.: Peter Lang 1992.

## WEINBRECHT 1993

Weinbrecht, J.: Ein Verfahren zur zielgerichteten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattfertigung: Zugleich Dissertation Universität Karlsruhe, 1993, Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 53. Eigenverlag 1993.

## WELLER 2002

Weller, R.: Verfahren zum kurzfristigen Störfallmanagement für die flexible Werkstattsteuerung: Zugleich Dissertation Universität Stuttgart, 2002, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 373. Heimsheim: Jost-Jetter 2002.

## WERTHMANN ET AL. 2012

Werthmann, D.; Lappe, D.; Otterstedt, N.; Scholz-Reiter, B.: Ortungsgestütztes Produktionsleitsystem für die Nacharbeit bei Automobilherstellern. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 3, S. 114–119.

## WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin u.a.: Springer 2006.

WEULE & SCHMITT 1989

Weule, H.; Schmitt, E.: Ein hierarchischer Lösungsansatz zur Auftragsreihenfolgeplanung bei mehrstufiger Werkstattfertigung. *wt Werkstattstechnik* 79 (1989), S. 333–336.

WIDMAIER 2000

Widmaier, U.: Das NIFA-Panel und der deutsche Maschinen- und Anlagenbau. In: Widmaier, U. (Hrsg.): *Der deutsche Maschinenbau in den neunziger Jahren: Kontinuität und Wandel einer Branche*. Frankfurt a. M.: Campus 2000, S. 23–41.

WIENDAHL ET AL. 2005

Wiendahl, H.-H.; Wiendahl, H.-P.; Cieminski, G. v.: Stolpersteine der PPS: Symptome – Ursachen – Lösungsansätze. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 9, S. 717–725.

WIENDAHL 1987a

Wiendahl, H.-P.: *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung: Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung*. München, Wien: Hanser 1987a.

WIENDAHL 1987b

Wiendahl, H.-P.: Von der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) zur Belastungsorientierten Fertigungssteuerung (BOS-F). In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung BOS-F*. Hannover: gfmt - Gesellschaft für Management und Technologie 1987b, S. 1–40.

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München: Hanser 1997.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Auflage. München: Hanser 2010.

WIENDAHL & WEDEMAYER 1990

Wiendahl, H.-P.; Wedemayer, H.-G. v.: Das Dilemma der Fertigungssteuerung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 60 (1990) 4, S. 407–422.

WIENDAHL ET AL. 1993a

Wiendahl, H.-P.; Pritschow, G.; Milberg, J.: Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen Teil 1. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 88 (1993a) 6, S. 265–268.

WIENDAHL ET AL. 1993b

Wiendahl, H.-P.; Pritschow, G.; Milberg, J.: Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen Teil 2. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 88 (1993b) 7-8, S. 352-354.

WIGHT 1984

Wight, O. W.: Manufacturing Resource Planning: MRP II : Unlocking America's Productivity Potential. Essex Junction, VT: O. Wight Ltd. Publications 1984.

WILDEMANN 1984

Wildemann, H.: Flexible Werkstattsteuerung durch Integration von Kanban-Prinzipien. 2. Auflage. München: gfmt - Gesellschaft für Management und Technologie 1984.

WILSON 2003

Wilson, J. M.: Gantt charts: A centenary appreciation. European Journal of Operational Research 149 (2003) 2, S. 430-437.

WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995

Wooldridge, M.; Jennings, N. R.: Intelligent agents: Theory and practice. The knowledge engineering review 10 (1995) 2, S. 115-152.

WÖRN & BRINKSCHULTE 2005

Wörn, H.; Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionen, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2005.

XIA & WU 2006

Xia, W.-J.; Wu, Z.-M.: A hybrid particle swarm optimization approach for the job-shop scheduling problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 29 (2006) 3-4, S. 360-366.

YAMADA & NAKANO 1997

Yamada, T.; Nakano, R.: Genetic Algorithms for Job-Shop Scheduling Problems. Proceedings of Modern Heuristic for Decision Support UNICOM seminar 18-19 March 1997, London (1997), S. 67-81.

YANG ET AL. 2008

Yang, G.; Lu, Y.; Ren-Wang, L.: Adaptive Genetic Algorithms for Job-Shop Scheduling Problems. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Piscataway 2008. S. 4501-4505.

ZÄH ET AL. 2004

Zäh, M. F.; Rudolf, H.; Schneider, R.: Genetische Algorithmen zur leitstands-basierten Reihenfolgeplanung von Produktfamilien. PPS Management 9 (2004) 2, S. 41–44.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München: Utz 2005, S. 3–10.

ZÄPFEL 1981

Zäpfel, G.: Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management. De Gruyter-Lehrbuch. Berlin, New York: De Gruyter 1981.

ZÄPFEL 1994

Zäpfel, G.: MRP II (Manufacturing Resource Planning) - ein organisatorisches Konzept und computergestütztes Informationssystem zur umfassenden logistischen Regelung der Material- und Warenflüsse. In: Zink, K. J. (Hrsg.): Wettbewerbsfähigkeit durch innovative Strukturen und Konzepte. München: Hanser 1994, REFA Fachbuchreihe Betriebsorganisation, S. 233–257.

ZÄPFEL 2001

Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement. 2. Auflage. München: Oldenbourg 2001.

ZÄPFEL & BRAUNE 2005

Zäpfel, G.; Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung: am Beispiel der Maschinenbelegung. WISO Kurzlehrbücher, Reihe Betriebswirtschaft. München: Vahlen 2005.

ZÄPFEL & MISSBAUER 1988

Zäpfel, G.; Missbauer, H.: Traditionelle Systeme der Produktionsplanung und -steuerung in der Fertigungsindustrie. Wirtschaftswissenschaftliches Studium 17 (1988) 2, S. 73–77.

ZELEWSKI 1991

Zelewski, S.: PPS-Expertensysteme. In: Spang, S.; Kraemer, W. (Hrsg.): Expertensysteme: Entscheidungsgrundlage für das Management. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1991, S. 251–283.

## ZETLMAYER 1994

Zetlmayer, H.: Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion: Zugleich Dissertation Technische Universität München, 1993, iwB-Forschungsberichte, Band 74. Berlin u.a.: Springer 1994.

## ZHANG ET AL. 2009

Zhang, G.; Shao, X.; Li, P.; Gao, L.: An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering* 56 (2009) 4, S. 1309–1318.

## ZHOU ET AL. 2008

Zhou, G.; Jiang, P.; Zheng, M.: A RFID-based Intelligent Control Framework for Plant Production. In: Yan, X.-T.; Jiang, C.; Eynard, B. (Hrsg.): *Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge*. London: Springer 2008, S. 263–272.

## ZIMMERMANN 1987

Zimmermann, G.: *PPS-Methoden auf dem Prüfstand: Was leisten sie, wann versagen sie?* Landsberg/Lech: verlag moderne industrie 1987.

## ZISKOVEN 2013

Ziskoven, H.: *Methodik zur Gestaltung und Auftragseinplanung einer getakteten Fertigung im Werkzeugbau: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2013, Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 17/2013*. Aachen: Apprimus 2013.

## ZWANZIG 2010

Zwanzig, F.: *Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus: Zugleich Dissertation RWTH Aachen, 2009, Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 1/2010*. Aachen: Apprimus 2010.



# **A Studie zur Werkstattfertigung in Deutschland**

## **A.1 Allgemeines**

Aussagen in der Literatur zur logistischen Leistungsfähigkeit der Werkstattfertigung beziehen sich stets auf den aktuellen Stand der technologischen Entwicklung. Durch technologischen Fortschritt, z. B. in Systemen zur Produktionsplanung und -steuerung, können sich hier Veränderungen ergeben, weswegen die Aussagen aus älteren Literaturquellen (z. B. EVERSHEIM 1989; KINGSMAN ET AL. 1989; KÖBERNIK 1999) zu hinterfragen sind. Aus diesem Grund erfolgte im Jahr 2012 eine Studie unter produzierenden Unternehmen, in der verschiedene Aspekte der PPS bei produzierenden Unternehmen kundenindividueller Produkte untersucht wurden.

Auszüge aus dieser Studie wurden bereits durch NIEHUES ET AL. (2012) veröffentlicht.

## **A.2 Randbedingungen der Studie**

Die Studie erfolgte über einen Online-Fragebogen, der auf der Website des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München über einen Direktlink abrufbar war. Dieser Link wurde per E-Mail an ausgewählte Teilnehmer versandt. Die Beantwortung der Fragen erfolgte anonym und es war nicht erforderlich, alle Fragen zu beantworten.

Der in Abschnitt A.4 vollständig abgedruckte Fragebogen ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden neben dem Auswahlkriterium der kundenindividuellen Produktion verschiedene Unternehmens- und Produktcharakteristika abgefragt. Daran schließt der Hauptteil der Studie an, der detaillierte Fragen zur Produktionssteuerung und zu Vorgängen in der Fertigung beinhaltet.

Zielgruppe der Studie sind Unternehmen mit einer kundenindividuellen Produktion, wie sie im deutschen Maschinen- und Anlagenbau in hohem Maß vertreten sind. Es ist zu erwarten, dass unter diesen Unternehmen ein hoher Anteil die Werkstattfertigung einsetzt (vgl. Abschnitt 1.2.1). Die Auswahl wurde dabei über einen Branchenfilter erstellt, sodass z. B. Automobilhersteller oder Unternehmen der chemischen Industrie, bei denen keine Werkstattfertigung zu erwarten ist, nicht betrachtet wurden. Insgesamt haben 146 von kontaktierten 868 Unternehmen an der Studie teilgenommen.

Alle Datensätze von Teilnehmern, die bestätigten, dass deren Unternehmen Produkte unter Berücksichtigung kundenindividueller Wünsche fertigen, wurden für den weiteren Verlauf der Studie berücksichtigt. Dies waren 125 von 146 Teilnehmer (85,62%). Die Verteilung über die einzelnen Branchen ist in Tabelle A.1 dargestellt.

**Tab. A.1:** Branchenzusammensetzung der Studienteilnehmer

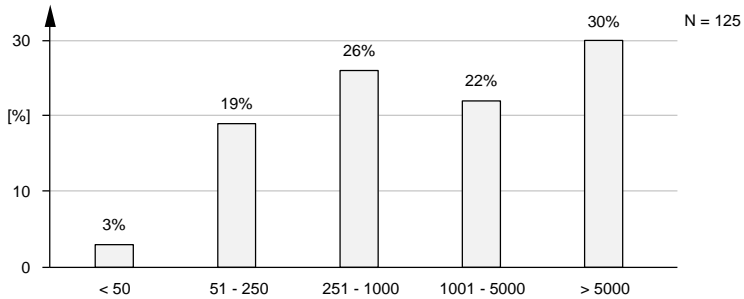
Frage: In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?		
Antwort	Absolut	Prozent [%]
Werkzeugmaschinen	16	12,8
Automobilindustrie & Fahrzeugbau	14	11,2
Luft- & Raumfahrtindustrie	13	10,4
Antriebstechnik	12	9,6
Elektroindustrie	8	6,4
Messtechnik & Sensorik	7	5,6
Montage & Handhabung von Industrierobotern	6	4,8
Verpackungsmaschinen	3	2,4
Druck- & Papiertechnik	2	1,6
Hydraulik/Pneumatik	2	1,6
Kunststoffindustrie	2	1,6
Prüfmaschinen	2	1,6
Textilmaschinen	2	1,6
Verfahrenstechnische Maschinen & Apparate	2	1,6
Feinmechanik-, Optik- & Uhrenindustrie	1	0,8
Lebensmittelindustrie	1	0,8
Sonstige	32	25,6
Summe	125	100

Als relevante Kennzahl für die Unternehmensgröße wurde die Anzahl der Mitarbeiter im Unternehmen herangezogen. Die Ergebnisse der Studie für die 125 relevanten Teilnehmer sind in Abb. A.1 dargestellt. Dabei sind vom KMU bis zum Großunternehmen alle Unternehmensgrößen vertreten. Mit 76 % gaben zudem mehr als ein Viertel der Teilnehmer an, dass deren Unternehmen mehr als einen Fertigungsstandort besitzt. Zusätzlich wurde die Art des Erzeugnisses abgefragt, aufgrund der Vielzahl an Antworten war aus diesen Ergebnissen aber keine Aussage abzuleiten.

### A.3 Ergebnisse der Studie

Im Folgenden werden die Studienergebnisse vorgestellt, wobei eine Beschränkung auf die Aussagen mit Relevanz für diese Arbeit erfolgt. Die Ergebnisse wurden durch Auswertung der Daten aus dem in Abschnitt A.4 vorgestellten





**Abb. A.1:** Mitarbeiteranzahl teilnehmender Unternehmen

Fragebogen gewonnen. Darüber hinaus konnten keine Aussagen zur Werkstattfertigung bzw. zur PPS in Werkstätten getroffen werden, sodass nicht alle Antworten der Befragung hier aufgelistet werden.

### Relevanz der Werkstattfertigung

Abb. A.2 zeigt die Verbreitung der klassischen Organisationsformen auf. Da hier eine Mehrfachnennung möglich war, liegt eine Gesamtzahl von 181 Antworten zugrunde. Die Werkstattfertigung ist bei der Produktion kundenindividueller Produkte neben der Fließfertigung die am häufigsten gewählte Organisationsform, während Werkbank- und Baustellenfertigung eher selten vorkommen. 81 der 125 Unternehmen gab an, nur eine Organisationsform zu nutzen, hier sind Werkstatt-, Gruppen- und Fließfertigung gleichermaßen stark vertreten.

Die Wahl der Organisationsform ist stark von den zu fertigenden Produkten abhängig. Dabei wurde angenommen, dass insbesondere die Wiederholhäufigkeit von Aufträgen mit gleichem Arbeitsplan, die Losgröße sowie der Grad der Kundenindividualisierung wichtige Einflussfaktoren sind. Im Folgenden werden nur die Antworten der 81 Unternehmen betrachtet, welche ihre Fertigung ausschließlich nach einem Organisationsprinzip strukturiert haben.

Abb. A.3 zeigt den Anteil der Organisationsform bei unterschiedlichen Auftragswiederholhäufigkeit, gemessen am Änderungsgrad der Arbeitspläne. Während bei Neukonstruktionen, d. h. jedes Produkt hat einen neuen Arbeitsplan, die Werkstattfertigung die dominierende Organisationsform ist, sind bei Anpassungskonstruktionen (Modifikationen des Arbeitsplans) sowie Serienprodukten stärker gerichtete Organisationsformen wie die Gruppen- oder Fließfertigung dominierend. Der Anteil der Werkstattfertigung nimmt mit steigender Wiederverwendung der Arbeitspläne ab, da die sich wiederholenden Arbeitsschritte in Fertigungslinien zusammengefasst werden können. Dennoch haben 25 % der Unternehmen, bei denen sich die Arbeitspläne nicht ändern, ihre Produktion nach dem Werkstattprinzip organisiert. Gründe hierfür können z. B. ein breites

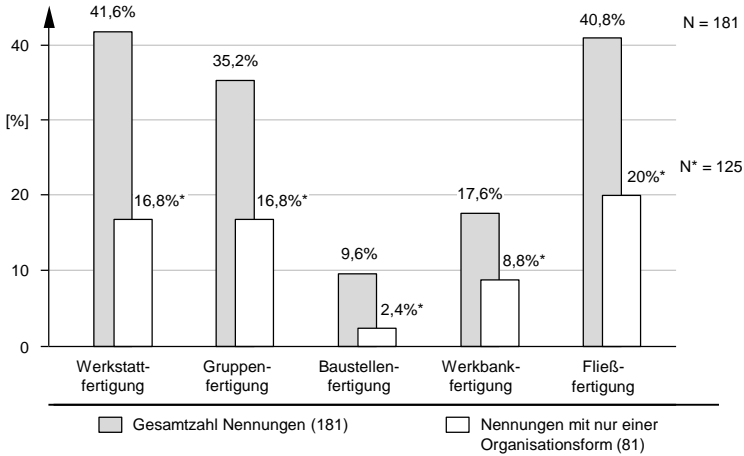


Abb. A.2: Organisationsform der Studienteilnehmer

Produktspektrum oder geringe Losgrößen sein, bei denen die Flexibilität der Werkstattfertigung benötigt wird. Die Nutzung des Werkbankprinzips, welches in der Regel bei Produktionsaufgaben, die nur in geringem Maß von ortsfesten Werkzeugen bzw. Werkzeugmaschinen abhängig sind, erfolgt unabhängig von der Wiederholhäufigkeit.

Wie in Abb. A.4 dargestellt, nimmt mit steigender Losgröße der Anteil der Gruppen- und Fließfertigung zu, wogegen der Anteil der anderen Organisationsformen abnimmt. In Bezug auf die Werkstattfertigung lässt sich die Einzel- und Kleinserienfertigung als Einsatzgebiet identifizieren. Die Baustellenfertigung wird ausschließlich in der Einzelfertigung angewendet, was sich mit dem Einsatzgebiet für ortsfest gebundene, sperrige Produkte (z. B. Schiffbau, Großmaschinen etc.) und deren oft hoher Kundenbezug erklären lässt.

Neben der Losgröße ist auch die Lage des Kundenentkopplungspunktes ein Gradmesser für die Produktindividualisierung. Zwei Drittel der werkstattfertigenden Unternehmen gaben an, kundenindividuelle Produkte (*Engineer-to-Order*) herzustellen, während mehr als die Hälfte der Unternehmen, die ihre Produktion nach dem Gruppen- oder Fließprinzip organisiert haben, lediglich Standardprodukte mit kundenindividuellen Anteilen (*Make-to-Order*) herstellt.

Die Ergebnisse belegen die Aussage von WIENDAHL (2010, S. 28f.), dass der Wiederholcharakter und die Losgröße einen Einfluss auf die Wahl der Organisationsform haben.

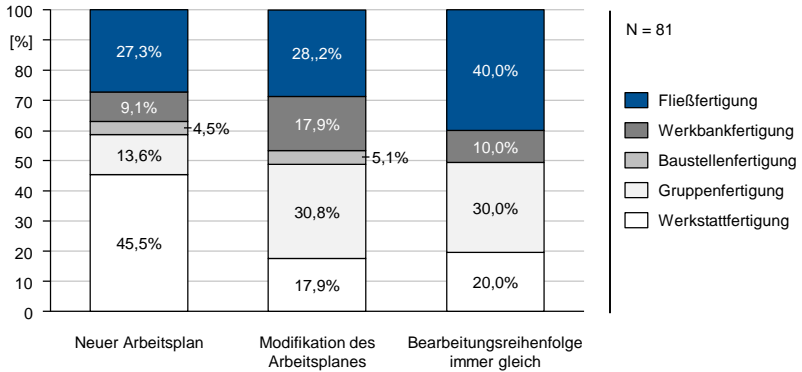


Abb. A.3: Auftragswiederholhäufigkeit in verschiedenen Organisationsformen

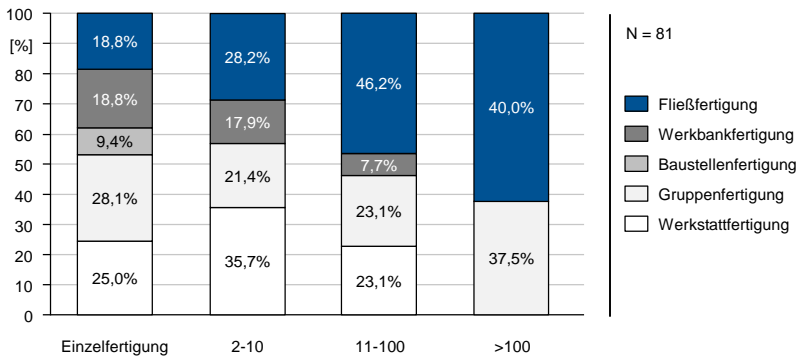


Abb. A.4: Losgröße in verschiedenen Organisationsformen

### Vorhersagegenauigkeit und Termintreue

Die Logistikleistung unterliegt sehr stark der technologischen Entwicklung, weswegen an dieser Stelle deren explizite Untersuchung, bezogen auf Liefertermine, sowie die Produktionsplanung und -steuerung, erfolgte.

Um die Ergebnisse auf die Organisationsform beziehen zu können, wurden bei der Studie ausschließlich die Unternehmen betrachtet, die ihre Produktion nach einem Organisationsprinzip organisiert haben. Des Weiteren wurden die Baustellen- und Werkbankfertigung aufgrund der geringen Anzahl an Nennungen sowie deren begrenzten Einsatzspektrum nicht weiter betrachtet. Die Gesamtzahl der im Folgenden betrachteten Unternehmen beläuft sich somit auf 67, wobei nicht bei jeder Frage alle Unternehmen eine Antwort abgegeben

haben. Die berücksichtigte Anzahl an Antworten ist in den Diagrammen mit  $N$  angegeben.

Die Werkstattfertigung ist aufgrund ihrer Struktur sehr flexibel hinsichtlich der Sequenzen, in denen die Aufträge an den unterschiedlichen Maschinen gefertigt werden. Wie Abb. A.5 zu entnehmen ist, bieten werkstattfertigende Unternehmen ihren Kunden wesentlich häufiger die Möglichkeit, Liefertermine gegen Zahlung vorzulegen als andere Unternehmen. Da Aufträge in der Werkstattfertigung in der Regel losweise bearbeitet und flexibel zwischen den Werkstätten transportiert werden, ist es ohne signifikanten Mehraufwand möglich, einzelne Aufträge gegenüber anderen vorzuziehen. Bei stärkerer Verkettung der einzelnen Arbeitsstationen, wie es in der Gruppen- und Fließfertigung der Fall ist, ist dies in der Regel mit höherem Aufwand verbunden. Diese Flexibilität in der Werkstattfertigung resultiert, wie bereits in Abschnitt 1.2.1 beschrieben, in einer höheren Steuerungskomplexität, die zur Planung realistischer Liefertermine sowie deren Erfüllung zu beherrschen ist.

Eine Aussage über die logistische Leistungsfähigkeit einer Produktion kann über die Kennzahlen Terminierung und Termintreue hergestellt werden. Die Terminierung gibt an, mit welcher Genauigkeit Liefertermine im Voraus bestimmt werden. Die Termintreue sagt dagegen aus, wie diese Termine auch eingehalten werden.

In Abb. A.6 sind die Ergebnisse der Befragung zu diesen beiden Kennzahlen dargestellt. Die Terminierung von Aufträgen erfolgt in der Werkstattfertigung wesentlich gröber im Vergleich zur Gruppen- und Fließfertigung. Dennoch ist die Termintreue in der Werkstattfertigung wesentlich schlechter als in den anderen Organisationsformen (vgl. Aussagen von ALTHALER ET AL. 2008). Studien des Fraunhofer ISI aus den Jahren 1997 und 1999 haben eine ähnliche hohe Termintreue in der Investitionsgüterindustrie ermittelt, sodass die Ergebnisse als repräsentativ anzunehmen sind (vgl. KINKEL & LAY 1998; LAY & KINKEL 2000). In der Werkstattfertigung ist allerdings keine Verbesserung zu den, unabhängig von der Organisationsform ermittelten Ergebnissen der beiden o. g. Studien zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass die PPS, deren Funktion unter anderem die Planung und Einhaltung der Fertigstellungstermine ist, bei der Werkstattfertigung Defizite in der Aufgabenerfüllung aufweist.

Die in Abb. A.7 dargestellte Auswertung nach Durchlaufzeiten bestätigt die Aussage langer Durchlaufzeiten aus der Literatur (vgl. z. B. VAHRENKAMP & SIEPERMANN 2008, S. 80). 86 % aller werkstattfertigenden Unternehmen gaben an, dass die Durchlaufzeit ihrer Produkte mehr als eine Woche beträgt. In der Fließfertigung macht dieser Anteil dagegen nur 44 % aus.

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Einhaltung von Lieferterminen sind Störungen im Produktionsablauf, die zu Verzögerungen und Umplanungen führen.

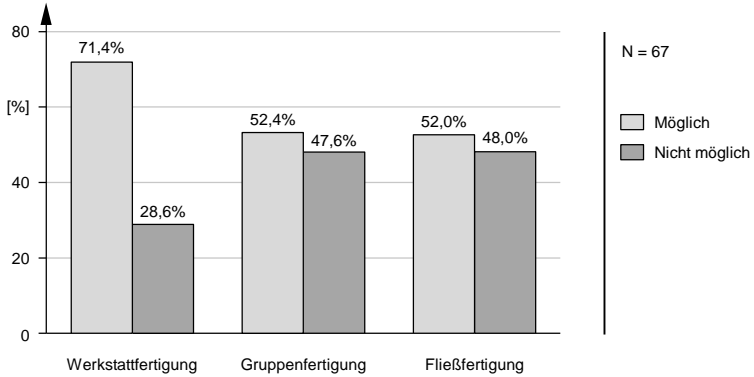


Abb. A.5: Vorverlegung von Lieferterminen gegen Zahlung

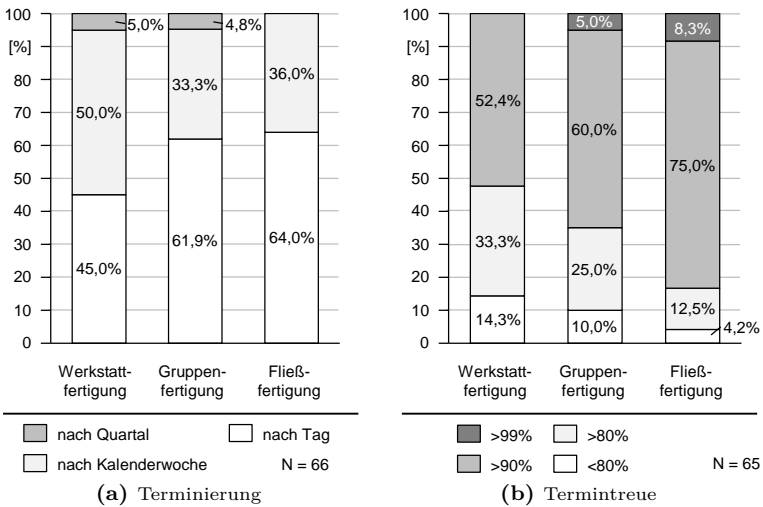


Abb. A.6: Terminierung und Termintreue nach Organisationsform

Diese oft unvorhersehbaren Ereignisse treten in allen betrachteten Organisationsformen auf (vgl. Abb. A.8). Während fast die Hälfte aller Unternehmen, die ihre Produktion nach der Fließfertigung strukturiert haben, weniger als eine Störung pro Tag benannt haben, ist bei mehr als drei Viertel der teilnehmenden werkstattfertigernden Unternehmen der Fertigungsablauf mindestens einmal pro Tag für wenigstens zehn Minuten unterbrochen, bei 19% sogar mehr als zehn Mal pro Tag.

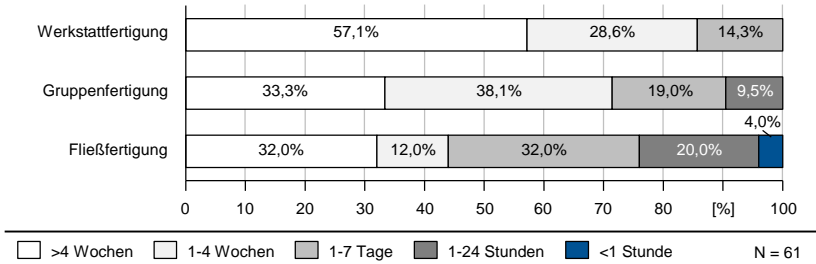


Abb. A.7: Durchlaufzeit nach Organisationsform

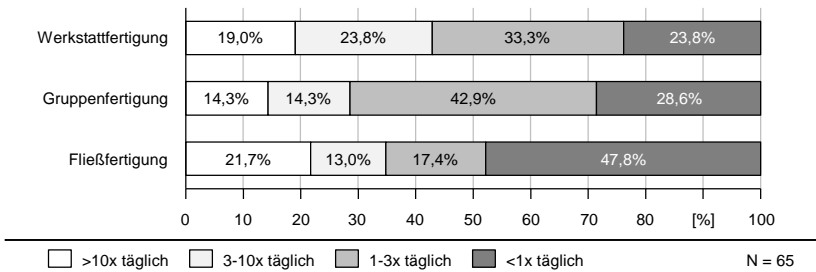


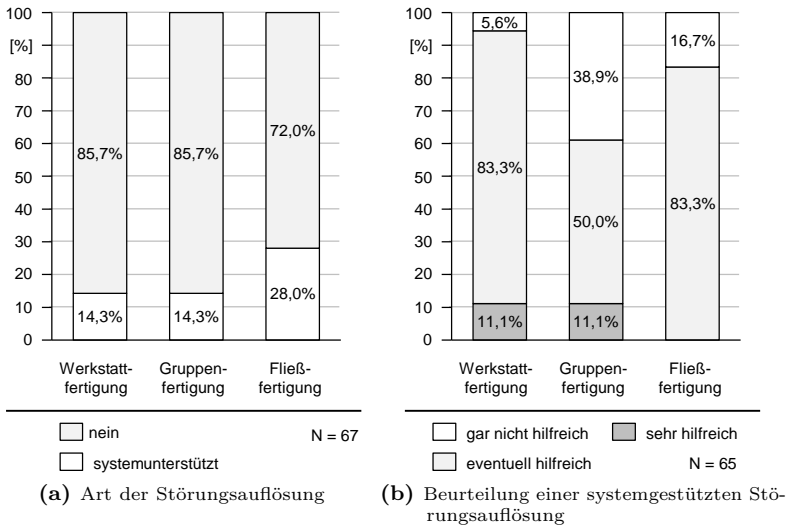
Abb. A.8: Häufigkeit von Störungen pro Tag nach Organisationsform. Störungen sind definiert als ungeplante Unterbrechungen von mehr als 10 Minuten.

Nur ein geringer Teil der Unternehmen löst die Auswirkungen dieser Störungen systemunterstützt. Der Anteil in der Fließfertigung ist dabei mit 28 % doppelt so hoch wie in der Werkstatt- oder Gruppenfertigung (vgl. Abb. A.9a).

Eine Angabe über die Art der Störungen ist der Befragung nicht zu entnehmen. Jedoch halten fast 95 % aller werkstattfertigenden Unternehmen eine Systemunterstützung für sehr oder eventuell hilfreich. Dieses lässt darauf schließen, dass keine adäquaten Systeme zur zielgerichteten Unterstützung des Störungsmanagements zur Verfügung stehen. Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Ausprägung von PPS-Systemen in den unterschiedlichen Organisationsformen.

### Systeme zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung

Die Ergebnisse in diesem Abschnitt befassen sich mit der Verbreitung und Nutzung verschiedener Systeme zur PPS. Auch hier wurden nur Unternehmen berücksichtigt, die ihre Produktion ausschließlich nach einem Organisationsprinzip strukturiert haben. Darüber hinaus wurden aufgrund der geringen Teilnehmerquote die Baustellen- und Werkbankfertigung nicht weiter betrachtet.



**Abb. A.9:** Auflösung bzw. Reaktion auf Störungen in der Produktion

Nahezu alle Unternehmen gaben an, ein Enterprise Resource Planning (ERP)-System zu nutzen. Nur 5 % der Unternehmen, die ihre Produktion nach der Gruppenfertigung strukturiert haben, verneinten die Verwendung eines solchen Systems. ERP-Systeme sind aber, wie in Abschnitt 1.2.3 beschrieben, vor allem für die Bereitstellung der Datenbasis sowie die Grobplanung im Rahmen der PPS einzusetzen, sodass mit ihnen keine leistungsfähige PPS möglich ist.

Für diesen Anwendungsfall sind Manufacturing Execution Systeme (MES) am Markt verfügbar, die eine Feinplanung und Steuerung ermöglichen (vgl. Abschnitt 1.2.3). Wie Abb. A.10a zeigt, sind diese in der Werkstattfertigung deutlich geringer verbreitet als in der Gruppen- oder Fließfertigung.

Ebenfalls wurde nach der Verwendung eines Fertigungsleitstands gefragt, der als eine der wichtigsten Komponenten eines Manufacturing Execution System (MES) hinsichtlich PPS gesehen wird. Hier wurde neben der Verwendung eines elektronischen Fertigungsleitstands, der entweder als Bestandteil eines MES oder als separates Softwaresystem ausgeprägt sein kann, auch die Möglichkeit eines manuellen Fertigungsleitstands, z. B. durch einen Meister oder Arbeitsplaner, der manuell oder mit einfachen Softwarewerkzeugen eine Koordination der Auftragsdurchläufe vornimmt, als Auswahlmöglichkeit angegeben.

Die Ergebnisse, in Abb. A.10b dargestellt, ähneln tendenziell denen zur Verwendung von MES. Ein Drittel aller werkstattfertigenden Unternehmen verwendet

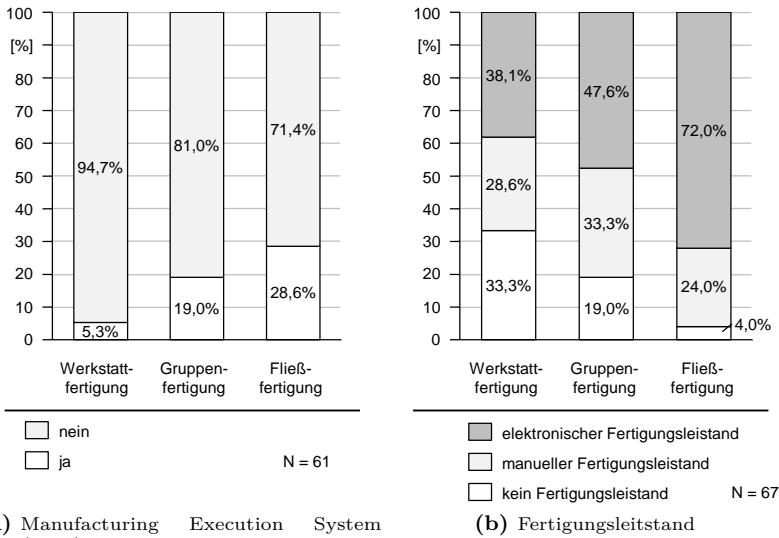


Abb. A.10: Systemunterstützung in der Produktionssteuerung nach Organisationsform

keinen Fertigungsleitstand, weniger als 40 % greifen auf Softwaresysteme zurück. Unternehmen, die ihre Fertigung nach dem Gruppen- oder Fließprinzip strukturiert haben, verwenden dagegen wesentlich häufiger Fertigungsleitstände.

LAY & WENGEL (1998) prognostizierten, dass sich die Verbreitung von Werkstattsteuerungssystemen bzw. Leitständen von 22 % im Jahre 1997 auf 35 % im Jahre 1999 und darüber hinaus steigern werde. In Bezug zu den vorliegenden Studienergebnissen lässt sich ableiten, dass die Verbreitung von Werkstattsteuerungssystemen überwiegend in der Gruppen- und Fließfertigung stattgefunden hat. In Verbindung mit der Aussage von KÖBERNIK (1999, S. 42), dass es kaum praktisch verwendbare Software für die Werkstattfertigung gibt, lässt sich schließen, dass die schlechte Durchsetzungskraft der Planung in der Werkstattfertigung insbesondere in der mangelnden Verfügbarkeit von geeigneten steuerungsunterstützenden Systemen begründet ist.

### Echtzeitgenaue Ortsbestimmung der Aufträge in der Werkstattfertigung

Insbesondere in der Werkstattfertigung ist eine zeitnahe Aktualisierung des Auftragsstatus mittels diskreten Erfassungspunkten schwer zu realisieren, da aufgrund der hohen Liegezeiten und ungerichteten Materialflüssen (vgl. Abschnitt 1.2.1) viele Ereignisse, wie z. B. Materialtransporte, nicht oder nur



mit unverhältnismäßig vielen Erfassungspunkten zu identifizieren sind. Für die schnelle Reaktion auf Störungen oder sonstige ungeplante Ereignisse ist die Verfügbarkeit solcher echtzeitnahen Daten jedoch unerlässlich (vgl. z. B. WIENDAHL ET AL. 2005).

85 % der befragten, werkstattfertigen Unternehmen verfügen nach eigenen Angaben über Informationen zum momentanen Standort jedes Auftrags. Dagegen sind nur 11 % der Unternehmen in der Lage, die Auftragsstandorte sekundengenau zu bestimmen (minutengenau: 17 %). Der Großteil von 72 % verfügt nur über tagesgenaue Standortinformationen.

## A.4 Fragebogen

Im Folgenden ist der Fragebogen der Studie abgedruckt. Erläuterungen zu Fragen und Antworten, die als Hilfestellung im Fragebogen hinterlegt waren, sind kursiv dargestellt.

**Frage 1** Werden in Ihrem Unternehmen eines oder mehrere Produkte nach dem in der Erklärung beschriebenen Prinzip gefertigt?

*Im Rahmen dieser Forschungsarbeit suchen wir Unternehmen, die eines oder mehrere Produkte in einer kundenindividuellen Produktion fertigen, die es ermöglicht kundenspezifische Wünsche zu berücksichtigen. Die Produktion kann sowohl rein auftragsbezogen, als auch in Kleinserienfertigung bei Losgrößen bis ca. 100 Stück erfolgen.*

- Ja  Nein

**Frage 2** In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Montanindustrie & Schwerindustrie          | <input type="checkbox"/> Hydraulik/Pneumatik   |
| <input type="checkbox"/> Werkzeugmaschinen                          | <input type="checkbox"/> Messtechnik & Sensorik                                      |
| <input type="checkbox"/> Kleineisenindustrie                        | <input type="checkbox"/> Büromaschinen   |
| <input type="checkbox"/> Verfahrenstechnische Maschinen & Apparate  | <input type="checkbox"/> Radio- & Fernsehgeräte                                      |
| <input type="checkbox"/> Automobilindustrie & Fahrzeugbau           | <input type="checkbox"/> Feinmechanik-, Optik- & Uhrenindustrie                      |
| <input type="checkbox"/> Luft- & Raumfahrtindustrie                 | <input type="checkbox"/> Glasindustrie   |
| <input type="checkbox"/> Schiffbauindustrie                         | <input type="checkbox"/> Kunststoffindustrie   |
| <input type="checkbox"/> Elektroindustrie                           | <input type="checkbox"/> Papierindustrie   |
| <input type="checkbox"/> Verpackungsmaschinen                       | <input type="checkbox"/> Pharmazeutische Industrie                                   |
| <input type="checkbox"/> Fördertechnik                              | <input type="checkbox"/> Holz- & Korkartikel   |
| <input type="checkbox"/> Druck- & Papiertechnik                     | <input type="checkbox"/> Lebensmittelindustrie                                       |
| <input type="checkbox"/> Textilmaschinen                            | <input type="checkbox"/> Textil- & Bekleidungsindustrie inklusive Pelz- & Lederwaren |
| <input type="checkbox"/> Montage & Handhabung von Industrierobotern | <input type="checkbox"/> Möbelindustrie  |
| <input type="checkbox"/> Strahltechnik                              | <input type="checkbox"/> Spielwarenindustrie   |
| <input type="checkbox"/> Prüfmaschinen                              | <input type="checkbox"/> Computerindustrie   |
| <input type="checkbox"/> Antriebstechnik                            | <input type="checkbox"/> Sonstiges (Eingabefeld)                                     |

**Frage 3** Wie viele Mitarbeiter sind in Ihrem Unternehmen ungefähr beschäftigt?

- <50
- 51-250
- 251-1000
- 1001-5000
- >5000

**Frage 4** Wie viele verschiedene Produktionsstandorte vereinigt Ihr Unternehmen?

- 1
- >1

**Frage 5** Bitte nennen Sie die Erzeugnisse Ihres Unternehmens, welche unter kundenindividuellen Gesichtspunkten gefertigt werden.

- Eingabefeld

**Frage 6** Wie stark kann sich die Bearbeitungsreihenfolge ein und desselben Produktes von einer Charge zur nächsten ändern?

- Erstellung eines komplett neuen Arbeitsplanes
- Die Bearbeitungsreihenfolge ist fest und somit immer gleich
- Modifikation des Arbeitsplanes

**Frage 7** Welche Größe umfasst ein Los des kundenindividuellen Produktes ungefähr?

- Einzelfertigung
- 2-10
- 11-100
- >100

**Frage 8** Nach welcher Organisationsform ist Ihre Fertigung strukturiert (Mehrfachantwort möglich)?

- Werkstattfertigung  
*In der Werkstattfertigung sind Maschinen gleicher Funktion in Gruppen angeordnet.*
- Gruppenfertigung  
*In der Gruppenfertigung werden mehrere Maschinen unterschiedlicher Funktion zu Bearbeitungszentren zusammengefasst. Eine Gruppe von Mitarbeitern führt dort weitgehend ohne starre Arbeitsteilung Fertigungsschritte aus.*
- Baustellenfertigung  
*Die Arbeitssysteme und Maschinen werden direkt zum Werkstück gebracht. Dies geschieht in der Regel bei sehr großen Werkstücken oder aus logistischen Gründen.*

- Werkbankprinzip

*Der Werker bearbeitet das Werkstück an einem einzelnen Arbeitsplatz und greift gegebenenfalls auf Maschinen zurück. Das Werkstück wird komplett an dem entsprechenden Arbeitsplatz gefertigt.*

- Fließfertigung

*Die Arbeitssysteme sind nach dem Materialfluss der zu fertigenden Varianten angeordnet. Das Werkstück wird direkt nach dem Bearbeiten an einer Arbeitsstation in der Regel automatisiert zur nächsten transportiert, die Bearbeitungszeit der ganzen Linie orientiert sich an einem vorgegebenen Arbeitstakt.*

**Frage 9** Wie viele Arbeitsschritte verrichten Sie an einem Rohteil, bis Ihr Produkt hergestellt ist?

- 0
- 1
- 2-5
- 6-20
- >20

**Frage 10** Wie viele Montageoperationen verrichten Sie an einem Rohteil, bis Ihr Produkt hergestellt ist?

- 0
- 1-10
- 11-50
- >50

**Frage 11** Welche Art der Kundenintegration bietet Ihr Unternehmen an (Mehrfachantwort möglich)?

- Kundenindividuelle Produkte (engineer to order)  
*Ein kundenindividuelles Produkt beinhaltet die Möglichkeit des Kunden ein Erzeugnis in Auftrag zu geben, welches im Extremfall eine völlige Neukonstruktion erfordert. Im Rahmen des technischen Produktionsspektrums des Unternehmens kann der Kunde einen Produktionsauftrag erstellen, welcher im Hinblick auf Einzelteile und Baugruppen keinerlei Gemeinsamkeiten mit bisher hergestellten Produkten aufweist.*
- Standardprodukte mit kundenspezifischen Varianten (make to order)  
*Ein Standardprodukt mit kundenspezifischen Varianten greift auf einen vorliegenden Fertigproduktgrundtypen zurück, welcher an spezielle Kundenwünsche angepasst wird. Kundenwünsche, die einen erhöhten Konstruktionsaufwand beinhalten sind möglich.*

**Frage 12** Nutzen Sie in Ihrem Unternehmen ein ERP-System (Enterprise Resource Planing)? Wenn ja, welches (Mehrfachantwort möglich)?

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Nein                        | <input type="checkbox"/> APplus                  |
| <input type="checkbox"/> SAP                         | <input type="checkbox"/> abas-Business-Software  |
| <input type="checkbox"/> Microsoft Dynamics NAV + AX | <input type="checkbox"/> Epicor                  |
| <input type="checkbox"/> infor                       | <input type="checkbox"/> SoftM                   |
| <input type="checkbox"/> Oracle                      | <input type="checkbox"/> Sage                    |
| <input type="checkbox"/> proALPHA                    | <input type="checkbox"/> Sonstiges (Eingabefeld) |

**Frage 13** Nutzen Sie in Ihrem Unternehmen ein MES-System (Manufacturing Execution System)? Wenn ja, welches?

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> nein | <input type="checkbox"/> ja (Eingabefeld) |
|-------------------------------|---|

**Frage 14** Wie genau terminieren Sie Lieferzeiten?

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Auf den Tag genau | <input type="checkbox"/> Nach Quartal |
| <input type="checkbox"/> Nach KW           |                                       |

**Frage 15** In wie viel Prozent der Fälle können Sie Liefertermine genau einhalten?

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> >99 % | <input type="checkbox"/> >80 % |
| <input type="checkbox"/> >90 % | <input type="checkbox"/> <80 % |

**Frage 16** Ist es möglich, einen geplanten Liefertermin (z.B. gegen Sonderzahlung) vorzuerlegen?

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
|-----------------------------|-------------------------------|

**Frage 17** Führen Sie regelmäßig Kapazitätsbelastungsabgleiche durch?

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
|-----------------------------|-------------------------------|

**Frage 18** Nutzen Sie in Ihrem Unternehmen einen Fertigungsleitstand?

- Elektronischer Fertigungsleitstand

*Ein elektronischer Fertigungsleitstand dient dazu, die Feinplanung von Arbeitsgängen und Produktionsaufträgen vorzunehmen. Das herkömmliche PPS-System (Produktionsplanungs- und Steuerungssystem) wird um eine detaillierte Fertigungssteuerung ergänzt, durch welche die vorangegangene Planung bis ins Detail verfeinert werden kann.*

- Manueller Fertigungsleitstand

*Ein Meister, der die Feinplanung mit „Stift und Papier“ durchführt, kann als manueller Fertigungsleitstand verstanden werden.*

- Kein Fertigungsleitstand

**Frage 19** Wie viele Aufträge bearbeiten Sie bei maximaler Kapazitätsauslastung im Fertigungsbereich parallel?

- <5  31-100  
 6-30  >100

**Frage 20** Verfügen Sie über Informationen, wo in der Produktion sich alle Ihre momentan zu bearbeitenden Werkstücke befinden? *Wenn Sie Informationen nur mit Hilfe eines Betriebsdatenerfassungssystems sammeln, antworten Sie bitte mit nein.*

- Nein  
 Ja (nennen sie bitte im folgenden Feld kurz Ihre Methode) (Eingabefeld)

**Frage 21** Falls Sie Frage 20 mit ja beantwortet haben: Mit welcher zeitlichen Toleranz können Sie den exakten Standort bestimmen?

- Sekundengenau  Tagesgenau  
 Minutengenau

**Frage 22** Wäre es für Sie hilfreich, wenn Sie den aktuellen Standort eines Produktes / Halbzeugs / Hilfsstoffes sekundengenau bestimmen könnten?

- Gar nicht hilfreich  Sehr hilfreich  
 Eventuell hilfreich

**Frage 23** Hat sich Ihr Unternehmen schon einmal mit der Einführung eines Ortungssystems mit Echtzeitgenauigkeit befasst bzw. ist Ihnen diese Technik als Produktionsunterstützung bekannt?

- Ja  Nein

**Frage 24** Wie oft treten Störungen (ungeplante Unterbrechungen des Fertigungsablaufes von mindestens 10 Minuten) in Ihrer Produktion auf?

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> >10x täglich  | <input type="checkbox"/> 1-3x täglich |
| <input type="checkbox"/> 3-10x täglich | <input type="checkbox"/> <1x täglich  |

**Frage 25** Wie lösen Sie eine Störung auf?

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Manuell | <input type="checkbox"/> Systemunterstützt |
|----------------------------------|--|

**Frage 26** Wäre es für Sie hilfreich, wenn Sie künftig Störungen systemunterstützt lösen könnten?

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Gar nicht hilfreich | <input type="checkbox"/> Sehr hilfreich |
| <input type="checkbox"/> Eventuell hilfreich |   |

**Frage 27** Wie lange benötigt Ihr Produkt, um den ganzen Fertigungsprozess zu durchlaufen (DLZ)?

- |                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> < 1 Stunde   | <input type="checkbox"/> 1-4 Wochen |
| <input type="checkbox"/> 1-24 Stunden | <input type="checkbox"/> >4 Wochen  |
| <input type="checkbox"/> 1-7 Tage     |                                     |

**Frage 28** Bitte schätzen Sie: Wie viel Prozent der Durchlaufzeit Ihres Produktes ist Bearbeitungszeit?

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> <10 %   | <input type="checkbox"/> 41-80 % |
| <input type="checkbox"/> 10-40 % | <input type="checkbox"/> >80 %   |

**Frage 29** Bitte schätzen Sie: Wie viel Prozent der Durchlaufzeit Ihres Produktes ist Transportzeit?

- |                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| <input type="checkbox"/> <1 %  | <input type="checkbox"/> 6-20 % |
| <input type="checkbox"/> 2-5 % | <input type="checkbox"/> >20 %  |





## B Ergänzende Ausführungen zur Reihenfolgeoptimierung

### B.1 Erzeugung ungültiger Lösungen

Anhand des folgenden Beispiels wird die Problematik der Erzeugung ungültiger Lösungen aufgezeigt. Grundlage ist die ARF-Matrix  $ARF_0$  mit drei Aufträgen auf drei Maschinen sowie deren zugehörige Prüfmatrix:

$$ARF_0 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad PR_{ARF_0} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Bei Auswahl der 1 als erste zu mutierende Zahl ergeben sich sechs potenzielle Lösungen durch jeweils dem Vertauschen der 1 mit einer anderen Zahl in den Spalten 2 und 3. Innerhalb der ersten Spalte führt jeder Zahlentausch zu einer ungültigen technologischen Reihenfolge, so dass hier keine Mutation möglich ist. Die Prüfmatrix ist als separate Matrix, abgetrennt durch ein Semikolon, angegeben. Aus Platzgründen wurde auf deren Benennung verzichtet.

$$ARF'_1 = \begin{pmatrix} 9 & 1 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 3 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_2 = \begin{pmatrix} 6 & 9 & 1 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$ARF'_3 = \begin{pmatrix} 7 & 9 & 6 \\ 5 & 1 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_4 = \begin{pmatrix} 2 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 1 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$ARF'_5 = \begin{pmatrix} 3 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 1 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_6 = \begin{pmatrix} 4 & 9 & 6 \\ 5 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Eine gültige Lösung entsteht, wenn die Distanz der zu tauschenden Werte in beiden Fällen kleiner gleich der Differenz zwischen der nächstgrößeren und nächstkleineren Zahl in der jeweils betroffenen Spalte ist. Für die Zahl 1 bedeuten Werte im Zahlenbereich  $[1; 4]$  keine Verletzung der technologischen Reihenfolge. Da aber ein Tausch mit der Zahl 4 in der dritten Spalte diese Randbedingung verletzt (die 4 kann nur durch 3 oder 5 ersetzt werden), sind ausschließlich die Lösungen  $ARF'_4$  (Tausch 1 und 2) und  $ARF'_5$  (Tausch 1 und 3) gültig.

Bei Werten, die sich nicht am Rande des Wertebereichs befinden, ist die Anzahl möglicher Tauschpartner etwas größer. Im folgenden Beispiel wurde die Zahl 5 in der Matrix  $ARF_0$  mit den sechs möglichen Werten getauscht:

$$ARF'_1 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 6 \\ 9 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_2 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 5 \\ 6 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$ARF'_3 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 7 & 5 & 2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_4 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 2 & 7 & 5 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$ARF'_5 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 3 & 7 & 2 \\ 8 & 5 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad ARF'_6 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 \\ 4 & 7 & 2 \\ 8 & 3 & 5 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Hierbei ergeben sich vier gültige Lösungen ( $ARF'_2$ ,  $ARF'_3$ ,  $ARF'_5$ ,  $ARF'_6$ ). Dennoch liegt die Wahrscheinlichkeit, eine ungültige Lösung zu erzeugen, bei einem Drittel.

Generell lässt sich die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Mutation nur bei Auswertung aller Mutationsmöglichkeiten herleiten, da dieser Wert stark von der Anzahl an Aufträgen und Maschinen sowie deren zeitlichen Verteilung abhängt. Je mehr andere Aufträge zwischen zwei Arbeitsvorgängen eines Auftrags liegen, desto weiter liegen zwei aufeinanderfolgende Werte in einer Spalte auseinander und desto mehr potenzielle Tauschpartner existieren. Des Weiteren sinkt die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Mutation mit steigender numerischer Entfernung der zu tauschenden Werte.

## B.2 Auswirkungen der Reparaturfunktion

Wie in Abschnitt 6.3.1.2 aufgeführt, wirken sich die reparaturbedingten Vertauschungen in der ARF-Matrix weitreichend aus. Nachfolgendes Beispiel veranschaulicht den Sachverhalt.

Eine Mutation der Werte 9 und 5 in der ersten Zeile der ARF-Matrix führt zur ungültigen Lösung  $ARF'$  und wird daher repariert zu  $ARF''$ :

$$ARF = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 5 \\ 7 & 8 & 2 \\ 4 & 3 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow ARF' = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 7 & 8 & 2 \\ 4 & 3 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow ARF'' = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 6 \\ 7 & 5 & 2 \\ 4 & 3 & 9 \end{pmatrix}$$

Die Auftragsreihenfolge auf Maschine  $M_1$  bleibt unverändert ( $J_1 \rightarrow J_3 \rightarrow J_2$ ), ebenso bleibt die Reihenfolge auf Maschine  $M_3$  bestehen. Die Reihenfolge auf Maschine  $M_2$  wurde hingegen von  $J_3 \rightarrow J_1 \rightarrow J_2$  zu  $J_3 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1$  verändert.

Die Mutation wirkt sich somit nach Reparatur auf die Auftragsfolge von Maschine  $M_2$  aus, obwohl ursprünglich eine Mutation der Reihenfolge auf Maschine  $M_1$  stattgefunden hat. Der Auftragsdurchlauf von Maschine  $M_1$  wird ausschließlich indirekt beeinflusst sofern sich im anschließenden Scheduling andere Leerzeiten und Endzeitpunkte ergeben. Somit ist durch die Kombination von Mutation und Reparaturfunktion mit der gewählten Repräsentationsform keine zielgerichtete Veränderung der Auftragsfolge auf einer Maschine möglich. Eine negative Beeinflussung findet dadurch, wie in Abschnitt 6.3.1.2 dargelegt, nicht statt.

### B.3 Steuerung der lokalen Suche

Am folgenden Beispiel wird aufgezeigt, durch welche Restriktionen die Nachbarschaftssuche auf einen kleinen oder großen Raum ausgeweitet werden kann. Die nachfolgende Matrix  $ARF_0$  wird hierzu mutiert, als erstes Tauschelement dient die 7:

$$ARF_0 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 \\ 2 & 3 & 9 \\ 5 & 7 & 8 \end{pmatrix}$$

Ein Tausch mit Zahlen, deren Betrag nahe der 7 liegt, ändert die technologische Reihenfolge nicht (5, 6, 7). Eine Reparatur dieser Lösungen ist daher nicht nötig. Die Maschinenfolgen werden dabei nur leicht beeinflusst, bei Lösung  $ARF'_6$  bleibt die ursprüngliche Reihenfolge sogar erhalten:

$$ARF'_5 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 \\ 2 & 3 & 9 \\ 7 & 5 & 8 \end{pmatrix} \quad ARF'_6 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 2 & 3 & 9 \\ 5 & 6 & 8 \end{pmatrix} \quad ARF'_8 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 \\ 2 & 3 & 9 \\ 5 & 8 & 7 \end{pmatrix}$$

Bei Tauschpartnern, deren Betrag sich zunehmend von der 7 entfernt, sind umfassende Reparaturen notwendig (1, 2, 9):

$$ARF''_1 = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 6 \\ 5 & 1 & 9 \\ 7 & 4 & 8 \end{pmatrix} \quad ARF''_2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 6 \\ 5 & 2 & 9 \\ 7 & 4 & 8 \end{pmatrix} \quad ARF''_9 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 \\ 2 & 3 & 8 \\ 5 & 9 & 7 \end{pmatrix}$$

Während sich bei  $ARF''_9$  nur eine Maschinenfolge ändert, werden bei  $ARF''_1$  und  $ARF''_2$  jeweils zwei Maschinenfolgen durch eine Mutation geändert, gleichzeitig erfolgen viele Platzwechsel.

Durch den Tausch zweier Elemente mit geringem Unterschied in deren Betrag kann eine lokale Suche gezielt gesteuert werden. Neue Lösungsräume erschließen sich durch den Tausch zweier Elemente mit größerem Betragsunterschied. Gleichzeitig kann die Anzahl zu tauschender Werte erhöht werden, was ebenfalls das Durchsuchen eines größeren Lösungsraums zur Folge hat.

## C Versuchsdaten zur Umsetzung

### C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

#### C.1.1 Faktorbestimmung

Die Faktorstufen der vollfaktoriellen Versuchsplanung sind in Tabelle C.1 dargestellt. Aufgrund des größeren Umfangs der *TA71*-Instanz wurden die Faktorstufen der Parameter  $n_{pop}$ ,  $d_{max}$  und  $TOL_{Akz}$  im Vergleich zur *FT10*-Instanz in der Höhe angepasst. Da bei einem vollfaktoriellen Versuch für jede Instanz  $2^8 = 256$  Faktorstufenkombinationen existieren, wird jede Kombination nur einmal realisiert. Nach KLEPPMANN (2013, S. 121ff.) lassen sich Versuchspläne mit mehr als fünf Faktoren auch ohne Berücksichtigung der Streuung, die bei mehrfachen Wiederholungen eines heuristischen Algorithmus zwangsläufig auftreten, „relativ gut auswerten“.

Tab. C.1: Faktorstufen zur Bestimmung der Einflussfaktoren

Instanz	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$\#kV$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$
<i>FT10</i>	3	10	10	25	5	3	1	0,001
	50	100	150	250	100	10	2	0,1
<i>TA71</i>	2	50	10	25	5	3	1	0,001
	20	1000	300	250	100	10	2	0,1

#### C.1.2 Vollfaktorielle Versuchspläne

Tab. C.2: Spezifikation des Computers der Versuchsläufe zum Neuplanungsalgorithmus

Betriebssystem:	Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1
Prozessor:	Intel® Xeon® CPU E5-26420 3.30 Ghz (2 Prozessoren)
RAM:	64 GB

**Tab. C.3:** Vollfaktorieller Versuchsplan mit je einer Realisierung sowie zugehörige Ergebnisse für die FT10-Benchmarkinstanz

Nr.	<i>FT10</i>									
	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
1	3	10	10	25	5	3	1	0,001	1176	0,86
2	50	10	10	25	5	3	1	0,001	1093	16,69
3	3	100	10	25	5	3	1	0,001	1142	1,20
4	50	100	10	25	5	3	1	0,001	1088	41,58
5	3	10	150	25	5	3	1	0,001	1202	0,81
6	50	10	150	25	5	3	1	0,001	1174	5,72
7	3	100	150	25	5	3	1	0,001	1181	0,37
8	50	100	150	25	5	3	1	0,001	1153	13,04
9	3	10	10	250	5	3	1	0,001	1147	0,93
10	50	10	10	250	5	3	1	0,001	1141	10,76
11	3	100	10	250	5	3	1	0,001	1105	3,33
12	50	100	10	250	5	3	1	0,001	1043	63,49
13	3	10	150	250	5	3	1	0,001	1132	1,21
14	50	10	150	250	5	3	1	0,001	1133	11,33
15	3	100	150	250	5	3	1	0,001	1188	0,52
16	50	100	150	250	5	3	1	0,001	1207	4,02
17	3	10	10	25	100	3	1	0,001	1099	15,81
18	50	10	10	25	100	3	1	0,001	1052	151,37
19	3	100	10	25	100	3	1	0,001	1045	22,72
20	50	100	10	25	100	3	1	0,001	981	474,60
21	3	10	150	25	100	3	1	0,001	1059	10,44
22	50	10	150	25	100	3	1	0,001	1067	109,76
23	3	100	150	25	100	3	1	0,001	1102	10,01
24	50	100	150	25	100	3	1	0,001	1070	125,03
25	3	10	10	250	100	3	1	0,001	1137	5,21
26	50	10	10	250	100	3	1	0,001	1059	95,37
27	3	100	10	250	100	3	1	0,001	1068	23,89
28	50	100	10	250	100	3	1	0,001	1050	357,43
29	3	10	150	250	100	3	1	0,001	1114	4,63
30	50	10	150	250	100	3	1	0,001	1057	147,82
31	3	100	150	250	100	3	1	0,001	1046	14,31
32	50	100	150	250	100	3	1	0,001	1078	208,04
33	3	10	10	25	5	10	1	0,001	1147	1,95

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Nr.	<i>FT10</i>									
	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
34	50	10	10	25	5	10	1	0,001	1085	61,34
35	3	100	10	25	5	10	1	0,001	1062	6,48
36	50	100	10	25	5	10	1	0,001	1083	57,05
37	3	10	150	25	5	10	1	0,001	1112	3,72
38	50	10	150	25	5	10	1	0,001	1132	22,99
39	3	100	150	25	5	10	1	0,001	1236	0,83
40	50	100	150	25	5	10	1	0,001	1143	43,67
41	3	10	10	250	5	10	1	0,001	1114	3,50
42	50	10	10	250	5	10	1	0,001	1088	50,58
43	3	100	10	250	5	10	1	0,001	1097	12,31
44	50	100	10	250	5	10	1	0,001	1087	114,23
45	3	10	150	250	5	10	1	0,001	1156	0,94
46	50	10	150	250	5	10	1	0,001	1104	46,51
47	3	100	150	250	5	10	1	0,001	1145	5,70
48	50	100	150	250	5	10	1	0,001	1108	64,47
49	3	10	10	25	100	10	1	0,001	1075	18,89
50	50	10	10	25	100	10	1	0,001	1073	229,46
51	3	100	10	25	100	10	1	0,001	970	101,51
52	50	100	10	25	100	10	1	0,001	1007	525,23
53	3	10	150	25	100	10	1	0,001	1059	28,62
54	50	10	150	25	100	10	1	0,001	981	749,57
55	3	100	150	25	100	10	1	0,001	1088	27,46
56	50	100	150	25	100	10	1	0,001	1012	428,10
57	3	10	10	250	100	10	1	0,001	1059	28,41
58	50	10	10	250	100	10	1	0,001	1059	529,31
59	3	100	10	250	100	10	1	0,001	1049	83,38
60	50	100	10	250	100	10	1	0,001	998	895,88
61	3	10	150	250	100	10	1	0,001	1073	24,75
62	50	10	150	250	100	10	1	0,001	1059	273,11
63	3	100	150	250	100	10	1	0,001	991	81,77
64	50	100	150	250	100	10	1	0,001	1081	805,74
65	3	10	10	25	5	3	2	0,001	1240	0,33
66	50	10	10	25	5	3	2	0,001	1147	7,70
67	3	100	10	25	5	3	2	0,001	1097	4,72
68	50	100	10	25	5	3	2	0,001	1126	13,69
69	3	10	150	25	5	3	2	0,001	1193	0,48

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>FT10</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$				
70	50	10	150	25	5	3	2	0,001	1112	20,94
71	3	100	150	25	5	3	2	0,001	1207	0,40
72	50	100	150	25	5	3	2	0,001	1174	7,98
73	3	10	10	250	5	3	2	0,001	1166	0,96
74	50	10	10	250	5	3	2	0,001	1147	11,15
75	3	100	10	250	5	3	2	0,001	1190	1,25
76	50	100	10	250	5	3	2	0,001	1082	73
77	3	10	150	250	5	3	2	0,001	1239	0,23
78	50	10	150	250	5	3	2	0,001	1114	10,38
79	3	100	150	250	5	3	2	0,001	1133	1,13
80	50	100	150	250	5	3	2	0,001	1189	4,17
81	3	10	10	25	100	3	2	0,001	1078	11,4
82	50	10	10	25	100	3	2	0,001	1078	99,51
83	3	100	10	25	100	3	2	0,001	1083	22,21
84	50	100	10	25	100	3	2	0,001	992	505,56
85	3	10	150	25	100	3	2	0,001	1150	7,88
86	50	10	150	25	100	3	2	0,001	1059	134,52
87	3	100	150	25	100	3	2	0,001	1060	18,83
88	50	100	150	25	100	3	2	0,001	1064	129,14
89	3	10	10	250	100	3	2	0,001	1078	9,65
90	50	10	10	250	100	3	2	0,001	1059	171,85
91	3	100	10	250	100	3	2	0,001	1076	25,75
92	50	100	10	250	100	3	2	0,001	1018	400,13
93	3	10	150	250	100	3	2	0,001	1068	9,90
94	50	10	150	250	100	3	2	0,001	1067	108,33
95	3	100	150	250	100	3	2	0,001	1112	9,83
96	50	100	150	250	100	3	2	0,001	1067	123,41
97	3	10	10	25	5	10	2	0,001	1083	5,17
98	50	10	10	25	5	10	2	0,001	1072	76,76
99	3	100	10	25	5	10	2	0,001	1124	5,65
100	50	100	10	25	5	10	2	0,001	1036	125,74
101	3	10	150	25	5	10	2	0,001	1143	2,44
102	50	10	150	25	5	10	2	0,001	1099	49,55
103	3	100	150	25	5	10	2	0,001	1165	2,26
104	50	100	150	25	5	10	2	0,001	1131	25,75
105	3	10	10	250	5	10	2	0,001	1141	2,16

Fortsetzung auf der nächsten Seite



## C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

<i>FT10</i>										
Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
106	50	10	10	250	5	10	2	0,001	1107	43,29
107	3	100	10	250	5	10	2	0,001	1102	8,98
108	50	100	10	250	5	10	2	0,001	1075	178,39
109	3	10	150	250	5	10	2	0,001	1091	3,51
110	50	10	150	250	5	10	2	0,001	1078	44
111	3	100	150	250	5	10	2	0,001	1190	2,52
112	50	100	150	250	5	10	2	0,001	1103	80,43
113	3	10	10	25	100	10	2	0,001	1093	24,96
114	50	10	10	25	100	10	2	0,001	989	677,17
115	3	100	10	25	100	10	2	0,001	992	67,52
116	50	100	10	25	100	10	2	0,001	1018	477,67
117	3	10	150	25	100	10	2	0,001	1064	24,01
118	50	10	150	25	100	10	2	0,001	1049	487,62
119	3	100	150	25	100	10	2	0,001	1068	28,45
120	50	100	150	25	100	10	2	0,001	998	573,74
121	3	10	10	250	100	10	2	0,001	1078	20,05
122	50	10	10	250	100	10	2	0,001	1059	279,44
123	3	100	10	250	100	10	2	0,001	1044	95,02
124	50	100	10	250	100	10	2	0,001	977	3500,27
125	3	10	150	250	100	10	2	0,001	1067	27,12
126	50	10	150	250	100	10	2	0,001	1049	289,26
127	3	100	150	250	100	10	2	0,001	1103	61,87
128	50	100	150	250	100	10	2	0,001	1049	1053,04
129	3	10	10	25	5	3	1	0,1	1147	1,28
130	50	10	10	25	5	3	1	0,1	1147	10,10
131	3	100	10	25	5	3	1	0,1	1123	3,07
132	50	100	10	25	5	3	1	0,1	1107	32,34
133	3	10	150	25	5	3	1	0,1	1147	0,79
134	50	10	150	25	5	3	1	0,1	1147	10,26
135	3	100	150	25	5	3	1	0,1	1205	0,35
136	50	100	150	25	5	3	1	0,1	1169	8,72
137	3	10	10	250	5	3	1	0,1	1176	0,84
138	50	10	10	250	5	3	1	0,1	1107	18,29
139	3	100	10	250	5	3	1	0,1	1154	1,67
140	50	100	10	250	5	3	1	0,1	1061	44,80
141	3	10	150	250	5	3	1	0,1	1165	0,65

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>FT10</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$				
142	50	10	150	250	5	3	1	0,1	1147	9,95
143	3	100	150	250	5	3	1	0,1	1253	0,40
144	50	100	150	250	5	3	1	0,1	1207	3,17
145	3	10	10	25	100	3	1	0,1	1059	15,97
146	50	10	10	25	100	3	1	0,1	1059	114,73
147	3	100	10	25	100	3	1	0,1	1044	32,76
148	50	100	10	25	100	3	1	0,1	1032	306,02
149	3	10	150	25	100	3	1	0,1	1078	6,57
150	50	10	150	25	100	3	1	0,1	1059	84,99
151	3	100	150	25	100	3	1	0,1	1068	8,77
152	50	100	150	25	100	3	1	0,1	964	177,68
153	3	10	10	250	100	3	1	0,1	1059	10,81
154	50	10	10	250	100	3	1	0,1	1059	117,97
155	3	100	10	250	100	3	1	0,1	1081	20,54
156	50	100	10	250	100	3	1	0,1	972	683,33
157	3	10	150	250	100	3	1	0,1	1059	10,58
158	50	10	150	250	100	3	1	0,1	1059	101,47
159	3	100	150	250	100	3	1	0,1	1106	14,85
160	50	100	150	250	100	3	1	0,1	992	184,62
161	3	10	10	25	5	10	1	0,1	1143	2,57
162	50	10	10	25	5	10	1	0,1	1059	104,02
163	3	100	10	25	5	10	1	0,1	1089	5,71
164	50	100	10	25	5	10	1	0,1	1112	60,97
165	3	10	150	25	5	10	1	0,1	1109	3,17
166	50	10	150	25	5	10	1	0,1	1093	51,11
167	3	100	150	25	5	10	1	0,1	1174	1,51
168	50	100	150	25	5	10	1	0,1	1065	87,72
169	3	10	10	250	5	10	1	0,1	1099	6,35
170	50	10	10	250	5	10	1	0,1	1114	27,63
171	3	100	10	250	5	10	1	0,1	1011	29,48
172	50	100	10	250	5	10	1	0,1	1058	151,86
173	3	10	150	250	5	10	1	0,1	1078	3,98
174	50	10	150	250	5	10	1	0,1	1078	48,87
175	3	100	150	250	5	10	1	0,1	1138	4
176	50	100	150	250	5	10	1	0,1	1131	43,88
177	3	10	10	25	100	10	1	0,1	1065	27,90

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>FT10</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$				
178	50	10	10	25	100	10	1	0,1	1049	352,23
179	3	100	10	25	100	10	1	0,1	1067	72,79
180	50	100	10	25	100	10	1	0,1	991	1630,01
181	3	10	150	25	100	10	1	0,1	1109	14,87
182	50	10	150	25	100	10	1	0,1	1059	245,86
183	3	100	150	25	100	10	1	0,1	1032	50,08
184	50	100	150	25	100	10	1	0,1	1022	492,75
185	3	10	10	250	100	10	1	0,1	1078	18,26
186	50	10	10	250	100	10	1	0,1	1049	473,79
187	3	100	10	250	100	10	1	0,1	1044	117,33
188	50	100	10	250	100	10	1	0,1	959	2364,98
189	3	10	150	250	100	10	1	0,1	1093	20,38
190	50	10	150	250	100	10	1	0,1	1065	385,15
191	3	100	150	250	100	10	1	0,1	1081	48,89
192	50	100	150	250	100	10	1	0,1	1008	1065,51
193	3	10	10	25	5	3	2	0,1	1196	0,51
194	50	10	10	25	5	3	2	0,1	1114	12,35
195	3	100	10	25	5	3	2	0,1	1132	1,78
196	50	100	10	25	5	3	2	0,1	1098	29,78
197	3	10	150	25	5	3	2	0,1	1148	0,65
198	50	10	150	25	5	3	2	0,1	1103	18,48
199	3	100	150	25	5	3	2	0,1	1153	1,41
200	50	100	150	25	5	3	2	0,1	1156	6,35
201	3	10	10	250	5	3	2	0,1	1147	0,62
202	50	10	10	250	5	3	2	0,1	1098	12,11
203	3	100	10	250	5	3	2	0,1	1120	4,24
204	50	100	10	250	5	3	2	0,1	1029	39,42
205	3	10	150	250	5	3	2	0,1	1240	0,32
206	50	10	150	250	5	3	2	0,1	1124	13,81
207	3	100	150	250	5	3	2	0,1	1287	0,18
208	50	100	150	250	5	3	2	0,1	1144	8,65
209	3	10	10	25	100	3	2	0,1	1078	8,05
210	50	10	10	25	100	3	2	0,1	1059	96,71
211	3	100	10	25	100	3	2	0,1	993	51,14
212	50	100	10	25	100	3	2	0,1	1018	495,7
213	3	10	150	25	100	3	2	0,1	1093	9,46

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>FT10</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$				
214	50	10	150	25	100	3	2	0,1	1059	107,16
215	3	100	150	25	100	3	2	0,1	1078	12,86
216	50	100	150	25	100	3	2	0,1	993	238,76
217	3	10	10	250	100	3	2	0,1	1078	13,61
218	50	10	10	250	100	3	2	0,1	1059	108,62
219	3	100	10	250	100	3	2	0,1	1072	18,60
220	50	100	10	250	100	3	2	0,1	995	573,53
221	3	10	150	250	100	3	2	0,1	1073	12,15
222	50	10	150	250	100	3	2	0,1	1059	112,19
223	3	100	150	250	100	3	2	0,1	1083	8,02
224	50	100	150	250	100	3	2	0,1	1037	274,28
225	3	10	10	25	5	10	2	0,1	1072	4,83
226	50	10	10	25	5	10	2	0,1	1072	92,36
227	3	100	10	25	5	10	2	0,1	1093	4,70
228	50	100	10	25	5	10	2	0,1	1116	47,94
229	3	10	150	25	5	10	2	0,1	1089	4,01
230	50	10	150	25	5	10	2	0,1	1078	51,45
231	3	100	150	25	5	10	2	0,1	1209	1,72
232	50	100	150	25	5	10	2	0,1	1122	45,72
233	3	10	10	250	5	10	2	0,1	1099	6,08
234	50	10	10	250	5	10	2	0,1	1063	107,26
235	3	100	10	250	5	10	2	0,1	1049	20,66
236	50	100	10	250	5	10	2	0,1	1061	256,13
237	3	10	150	250	5	10	2	0,1	1107	2,79
238	50	10	150	250	5	10	2	0,1	1095	45,73
239	3	100	150	250	5	10	2	0,1	1147	5,38
240	50	100	150	250	5	10	2	0,1	1148	33,54
241	3	10	10	25	100	10	2	0,1	1065	30,87
242	50	10	10	25	100	10	2	0,1	1059	308,47
243	3	100	10	25	100	10	2	0,1	1049	37,89
244	50	100	10	25	100	10	2	0,1	965	1049,23
245	3	10	150	25	100	10	2	0,1	1067	20,92
246	50	10	150	25	100	10	2	0,1	1053	582,48
247	3	100	150	25	100	10	2	0,1	1024	54,08
248	50	100	150	25	100	10	2	0,1	1083	429,74
249	3	10	10	250	100	10	2	0,1	1064	31,3

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

<i>FT10</i>										
Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
250	50	10	10	250	100	10	2	0,1	1059	328,5
251	3	100	10	250	100	10	2	0,1	1083	75,6
252	50	100	10	250	100	10	2	0,1	982	1066,95
253	3	10	150	250	100	10	2	0,1	1059	23,16
254	50	10	150	250	100	10	2	0,1	1059	260,75
255	3	100	150	250	100	10	2	0,1	1072	40,62
256	50	100	150	250	100	10	2	0,1	1069	616,16

**Tab. C.4:** Vollfaktorieller Versuchsplan mit je einer Realisierung sowie zugehörige Ergebnisse für die TA71-Benchmarkinstanz

Nr.	TA71									
	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVern_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$	
1	2	50	10	25	5	3	1	0,001	7935	4,16
2	20	50	10	25	5	3	1	0,001	7945	15,42
3	2	1000	10	25	5	3	1	0,001	7398	34,83
4	20	1000	10	25	5	3	1	0,001	7535	149,41
5	2	50	300	25	5	3	1	0,001	7793	7,57
6	20	50	300	25	5	3	1	0,001	7870	24,59
7	2	1000	300	25	5	3	1	0,001	7986	1,94
8	20	1000	300	25	5	3	1	0,001	7627	86,20
9	2	50	10	250	5	3	1	0,001	7847	5,97
10	20	50	10	250	5	3	1	0,001	7926	24,46
11	2	1000	10	250	5	3	1	0,001	7739	14,51
12	20	1000	10	250	5	3	1	0,001	7583	166,09
13	2	50	300	250	5	3	1	0,001	8008	2,50
14	20	50	300	250	5	3	1	0,001	7917	26,86
15	2	1000	300	250	5	3	1	0,001	7924	2,87
16	20	1000	300	250	5	3	1	0,001	7721	48,75
17	2	50	10	25	100	3	1	0,001	7430	203,77
18	20	50	10	25	100	3	1	0,001	6950	2.895,71
19	2	1000	10	25	100	3	1	0,001	6441	2.240,23
20	20	1000	10	25	100	3	1	0,001	6330	17.458,92
21	2	50	300	25	100	3	1	0,001	7162	287,00
22	20	50	300	25	100	3	1	0,001	7293	731,37
23	2	1000	300	25	100	3	1	0,001	7132	260,17
24	20	1000	300	25	100	3	1	0,001	7039	892,29
25	2	50	10	250	100	3	1	0,001	7654	60,94
26	20	50	10	250	100	3	1	0,001	7333	834,64
27	2	1000	10	250	100	3	1	0,001	6545	1.450,85
28	20	1000	10	250	100	3	1	0,001	6358	13.479,80
29	2	50	300	250	100	3	1	0,001	7317	155,32
30	20	50	300	250	100	3	1	0,001	7125	1.697,84
31	2	1000	300	250	100	3	1	0,001	7137	181,37
32	20	1000	300	250	100	3	1	0,001	6814	1.949,56
33	2	50	10	25	5	10	1	0,001	7802	16,81

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
34	20	50	10	25	5	10	1	0,001	7552	492,24
35	2	1000	10	25	5	10	1	0,001	6984	252,45
36	20	1000	10	25	5	10	1	0,001	7109	1.135,95
37	2	50	300	25	5	10	1	0,001	7911	14,00
38	20	50	300	25	5	10	1	0,001	7599	337,66
39	2	1000	300	25	5	10	1	0,001	7389	69,45
40	20	1000	300	25	5	10	1	0,001	7231	510,39
41	2	50	10	250	5	10	1	0,001	7541	71,50
42	20	50	10	250	5	10	1	0,001	7584	313,20
43	2	1000	10	250	5	10	1	0,001	7486	83,95
44	20	1000	10	250	5	10	1	0,001	6962	2.654,59
45	2	50	300	250	5	10	1	0,001	7879	13,71
46	20	50	300	250	5	10	1	0,001	7536	291,86
47	2	1000	300	250	5	10	1	0,001	7451	65,54
48	20	1000	300	250	5	10	1	0,001	7322	731,14
49	2	50	10	25	100	10	1	0,001	7034	646,29
50	20	50	10	25	100	10	1	0,001	6768	6.831,83
51	2	1000	10	25	100	10	1	0,001	6662	1.662,21
52	20	1000	10	25	100	10	1	0,001	6422	16.431,85
53	2	50	300	25	100	10	1	0,001	7135	453,13
54	20	50	300	25	100	10	1	0,001	7106	3.411,08
55	2	1000	300	25	100	10	1	0,001	6727	865,27
56	20	1000	300	25	100	10	1	0,001	7008	3.190,61
57	2	50	10	250	100	10	1	0,001	7219	502,51
58	20	50	10	250	100	10	1	0,001	6864	6.473,61
59	2	1000	10	250	100	10	1	0,001	6501	3.934,41
60	20	1000	10	250	100	10	1	0,001	6162	85.029,59
61	2	50	300	250	100	10	1	0,001	7122	1.000,04
62	20	50	300	250	100	10	1	0,001	6736	10.634,08
63	2	1000	300	250	100	10	1	0,001	6779	2.180,49
64	20	1000	300	250	100	10	1	0,001	6602	16.034,72
65	2	50	10	25	5	3	2	0,001	8021	1,62
66	20	50	10	25	5	3	2	0,001	7871	40,15
67	2	1000	10	25	5	3	2	0,001	7645	21,20
68	20	1000	10	25	5	3	2	0,001	7547	191,68
69	2	50	300	25	5	3	2	0,001	8021	1,31

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	<i>RZ</i>
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
70	20	50	300	25	5	3	2	0,001	7853	31,06
71	2	1000	300	25	5	3	2	0,001	7876	3,02
72	20	1000	300	25	5	3	2	0,001	7645	89,64
73	2	50	10	250	5	3	2	0,001	7941	3,05
74	20	50	10	250	5	3	2	0,001	7965	17,39
75	2	1000	10	250	5	3	2	0,001	7503	28,48
76	20	1000	10	250	5	3	2	0,001	7243	494,43
77	2	50	300	250	5	3	2	0,001	8021	1,54
78	20	50	300	250	5	3	2	0,001	7930	25,91
79	2	1000	300	250	5	3	2	0,001	7796	4,37
80	20	1000	300	250	5	3	2	0,001	7778	33,25
81	2	50	10	25	100	3	2	0,001	7174	431,76
82	20	50	10	25	100	3	2	0,001	6994	2.594,41
83	2	1000	10	25	100	3	2	0,001	6704	1.236,06
84	20	1000	10	25	100	3	2	0,001	6197	19.821,88
85	2	50	300	25	100	3	2	0,001	7200	311,24
86	20	50	300	25	100	3	2	0,001	7188	1.362,32
87	2	1000	300	25	100	3	2	0,001	7040	284,79
88	20	1000	300	25	100	3	2	0,001	6726	3.012,62
89	2	50	10	250	100	3	2	0,001	7299	237,27
90	20	50	10	250	100	3	2	0,001	6924	4.002,50
91	2	1000	10	250	100	3	2	0,001	6594	1.219,88
92	20	1000	10	250	100	3	2	0,001	6376	11.393,18
93	2	50	300	250	100	3	2	0,001	7239	213,57
94	20	50	300	250	100	3	2	0,001	7289	961,47
95	2	1000	300	250	100	3	2	0,001	7085	204,20
96	20	1000	300	250	100	3	2	0,001	6807	1.945,31
97	2	50	10	25	5	10	2	0,001	7726	33,26
98	20	50	10	25	5	10	2	0,001	7580	367,79
99	2	1000	10	25	5	10	2	0,001	6975	326,60
100	20	1000	10	25	5	10	2	0,001	7050	1.267,07
101	2	50	300	25	5	10	2	0,001	7850	13,91
102	20	50	300	25	5	10	2	0,001	7574	414,69
103	2	1000	300	25	5	10	2	0,001	7173	114,12
104	20	1000	300	25	5	10	2	0,001	7439	359,69
105	2	50	10	250	5	10	2	0,001	7657	38,48

Fortsetzung auf der nächsten Seite



## C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
106	20	50	10	250	5	10	2	0,001	7436	800,62
107	2	1000	10	250	5	10	2	0,001	7012	455,09
108	20	1000	10	250	5	10	2	0,001	6870	4.438,24
109	2	50	300	250	5	10	2	0,001	7711	32,02
110	20	50	300	250	5	10	2	0,001	7673	229,77
111	2	1000	300	250	5	10	2	0,001	7512	49,49
112	20	1000	300	250	5	10	2	0,001	7196	782,26
113	2	50	10	25	100	10	2	0,001	6914	982,60
114	20	50	10	25	100	10	2	0,001	6758	8.103,24
115	2	1000	10	25	100	10	2	0,001	6321	2.861,81
116	20	1000	10	25	100	10	2	0,001	6321	24.413,26
117	2	50	300	25	100	10	2	0,001	7616	146,73
118	20	50	300	25	100	10	2	0,001	6906	4.366,44
119	2	1000	300	25	100	10	2	0,001	6795	741,75
120	20	1000	300	25	100	10	2	0,001	6866	4.709,11
121	2	50	10	250	100	10	2	0,001	7370	325,85
122	20	50	10	250	100	10	2	0,001	6793	9.377,71
123	2	1000	10	250	100	10	2	0,001	6541	3.707,08
124	20	1000	10	250	100	10	2	0,001	6131	79.732,64
125	2	50	300	250	100	10	2	0,001	7087	1.057,58
126	20	50	300	250	100	10	2	0,001	7010	5.375,94
127	2	1000	300	250	100	10	2	0,001	6873	1.251,06
128	20	1000	300	250	100	10	2	0,001	6481	23.900,64
129	2	50	10	25	5	3	1	0,1	8021	1,59
130	20	50	10	25	5	3	1	0,1	7862	38,14
131	2	1000	10	25	5	3	1	0,1	7642	18,70
132	20	1000	10	25	5	3	1	0,1	7449	166,29
133	2	50	300	25	5	3	1	0,1	8021	1,48
134	20	50	300	25	5	3	1	0,1	7934	30,13
135	2	1000	300	25	5	3	1	0,1	7755	6,55
136	20	1000	300	25	5	3	1	0,1	7730	57,78
137	2	50	10	250	5	3	1	0,1	8021	1,56
138	20	50	10	250	5	3	1	0,1	7924	25,54
139	2	1000	10	250	5	3	1	0,1	7726	12,69
140	20	1000	10	250	5	3	1	0,1	7643	116,65
141	2	50	300	250	5	3	1	0,1	8021	1,51

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
142	20	50	300	250	5	3	1	0,1	7926	19,14
143	2	1000	300	250	5	3	1	0,1	7767	7,41
144	20	1000	300	250	5	3	1	0,1	7759	69,23
145	2	50	10	25	100	3	1	0,1	7244	349,04
146	20	50	10	25	100	3	1	0,1	7013	2.972,89
147	2	1000	10	25	100	3	1	0,1	6567	1.301,95
148	20	1000	10	25	100	3	1	0,1	6379	9.066,12
149	2	50	300	25	100	3	1	0,1	7701	56,47
150	20	50	300	25	100	3	1	0,1	7067	1.935,23
151	2	1000	300	25	100	3	1	0,1	6973	294,10
152	20	1000	300	25	100	3	1	0,1	6410	4.902,44
153	2	50	10	250	100	3	1	0,1	7256	283,18
154	20	50	10	250	100	3	1	0,1	6954	2.280,78
155	2	1000	10	250	100	3	1	0,1	6326	2.515,81
156	20	1000	10	250	100	3	1	0,1	6117	29.748,54
157	2	50	300	250	100	3	1	0,1	7259	233,91
158	20	50	300	250	100	3	1	0,1	7029	2.367,82
159	2	1000	300	250	100	3	1	0,1	6950	247,07
160	20	1000	300	250	100	3	1	0,1	6610	2.842,24
161	2	50	10	25	5	10	1	0,1	7808	22,43
162	20	50	10	25	5	10	1	0,1	7730	190,37
163	2	1000	10	25	5	10	1	0,1	6961	353,04
164	20	1000	10	25	5	10	1	0,1	7075	1.640,29
165	2	50	300	25	5	10	1	0,1	7836	22,66
166	20	50	300	25	5	10	1	0,1	7704	293,64
167	2	1000	300	25	5	10	1	0,1	7190	130,04
168	20	1000	300	25	5	10	1	0,1	7544	329,78
169	2	50	10	250	5	10	1	0,1	7642	57,90
170	20	50	10	250	5	10	1	0,1	7624	534,20
171	2	1000	10	250	5	10	1	0,1	7126	418,62
172	20	1000	10	250	5	10	1	0,1	6993	3.815,63
173	2	50	300	250	5	10	1	0,1	7639	45,93
174	20	50	300	250	5	10	1	0,1	7577	374,03
175	2	1000	300	250	5	10	1	0,1	7717	16,06
176	20	1000	300	250	5	10	1	0,1	7349	793,37
177	2	50	10	25	100	10	1	0,1	7152	572,88

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
178	20	50	10	25	100	10	1	0,1	6907	6.036,80
179	2	1000	10	25	100	10	1	0,1	6463	2.490,49
180	20	1000	10	25	100	10	1	0,1	6260	22.767,31
181	2	50	300	25	100	10	1	0,1	7122	752,40
182	20	50	300	25	100	10	1	0,1	6681	8.260,07
183	2	1000	300	25	100	10	1	0,1	6570	1.473,50
184	20	1000	300	25	100	10	1	0,1	6418	7.728,63
185	2	50	10	250	100	10	1	0,1	7258	344,86
186	20	50	10	250	100	10	1	0,1	6839	6.452,76
187	2	1000	10	250	100	10	1	0,1	6470	3.288,88
188	20	1000	10	250	100	10	1	0,1	6145	85.258,24
189	2	50	300	250	100	10	1	0,1	7051	894,26
190	20	50	300	250	100	10	1	0,1	6939	9.132,13
191	2	1000	300	250	100	10	1	0,1	6752	1.418,85
192	20	1000	300	250	100	10	1	0,1	6375	28.794,99
193	2	50	10	25	5	3	2	0,1	8021	1,52
194	20	50	10	25	5	3	2	0,1	7949	14,53
195	2	1000	10	25	5	3	2	0,1	7763	10,77
196	20	1000	10	25	5	3	2	0,1	7434	198,22
197	2	50	300	25	5	3	2	0,1	7932	2,78
198	20	50	300	25	5	3	2	0,1	7952	17,84
199	2	1000	300	25	5	3	2	0,1	7768	5,17
200	20	1000	300	25	5	3	2	0,1	7776	28,13
201	2	50	10	250	5	3	2	0,1	8000	2,83
202	20	50	10	250	5	3	2	0,1	7765	52,62
203	2	1000	10	250	5	3	2	0,1	7668	11,23
204	20	1000	10	250	5	3	2	0,1	7289	311,82
205	2	50	300	250	5	3	2	0,1	7933	3,19
206	20	50	300	250	5	3	2	0,1	7840	18,57
207	2	1000	300	250	5	3	2	0,1	7642	9,46
208	20	1000	300	250	5	3	2	0,1	7849	22,24
209	2	50	10	25	100	3	2	0,1	7428	117,90
210	20	50	10	25	100	3	2	0,1	6921	2.532,93
211	2	1000	10	25	100	3	2	0,1	6867	532,09
212	20	1000	10	25	100	3	2	0,1	6111	29.033,61
213	2	50	300	25	100	3	2	0,1	7222	274,20

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	<i>TA71</i>			$\delta$	$\epsilon$	$C_{max}$	$RZ$
				$AzVern_{kV}$	$AzNk$					
214	20	50	300	25	100	3	2	0,1	7143	1.306,97
215	2	1000	300	25	100	3	2	0,1	6773	508,91
216	20	1000	300	25	100	3	2	0,1	6959	1.521,10
217	2	50	10	250	100	3	2	0,1	7271	224,07
218	20	50	10	250	100	3	2	0,1	6663	4.958,94
219	2	1000	10	250	100	3	2	0,1	6729	874,01
220	20	1000	10	250	100	3	2	0,1	6046	33.289,79
221	2	50	300	250	100	3	2	0,1	7254	306,41
222	20	50	300	250	100	3	2	0,1	6938	2.676,82
223	2	1000	300	250	100	3	2	0,1	6860	391,97
224	20	1000	300	250	100	3	2	0,1	6352	4.417,61
225	2	50	10	25	5	10	2	0,1	7888	14,31
226	20	50	10	25	5	10	2	0,1	7497	537,08
227	2	1000	10	25	5	10	2	0,1	7101	325,51
228	20	1000	10	25	5	10	2	0,1	6735	2.925,83
229	2	50	300	25	5	10	2	0,1	7745	45,99
230	20	50	300	25	5	10	2	0,1	7824	98,66
231	2	1000	300	25	5	10	2	0,1	7654	24,32
232	20	1000	300	25	5	10	2	0,1	7163	828,61
233	2	50	10	250	5	10	2	0,1	7743	44,73
234	20	50	10	250	5	10	2	0,1	7623	432,36
235	2	1000	10	250	5	10	2	0,1	6970	474,00
236	20	1000	10	250	5	10	2	0,1	7073	2.414,35
237	2	50	300	250	5	10	2	0,1	7667	56,26
238	20	50	300	250	5	10	2	0,1	7720	258,71
239	2	1000	300	250	5	10	2	0,1	7528	93,93
240	20	1000	300	250	5	10	2	0,1	7332	570,63
241	2	50	10	25	100	10	2	0,1	7283	546,84
242	20	50	10	25	100	10	2	0,1	6927	5.627,66
243	2	1000	10	25	100	10	2	0,1	6393	2.285,67
244	20	1000	10	25	100	10	2	0,1	6197	33.761,37
245	2	50	300	25	100	10	2	0,1	7128	769,96
246	20	50	300	25	100	10	2	0,1	6598	18.917,99
247	2	1000	300	25	100	10	2	0,1	6597	1.340,77
248	20	1000	300	25	100	10	2	0,1	6538	7.162,68
249	2	50	10	250	100	10	2	0,1	7293	573,77

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Nr.	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{A_{kz}}$	<i>TA71</i>				$\epsilon$	$C_{max}$	<i>RZ</i>
				$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$			
250	20	50	10	250	100	10	2	0,1	7002	3.908,53
251	2	1000	10	250	100	10	2	0,1	6471	5.032,15
252	20	1000	10	250	100	10	2	0,1	6108	65.604,33
253	2	50	300	250	100	10	2	0,1	7015	842,18
254	20	50	300	250	100	10	2	0,1	7053	3.151,65
255	2	1000	300	250	100	10	2	0,1	6816	1.217,41
256	20	1000	300	250	100	10	2	0,1	6289	26.429,02

### C.1.3 Ermittlung der Faktoreffekte

**Tab. C.5:** Faktoreffekte und Effekte der Wechselwirkungen aus den vollfaktoriellen Versuchen

LG: Lösungsgüte; Sign.: Signifikanz; RZ: Rechenzeit  
 Faktoren:  $A = n_{pop}$ ;  $B = d_{max}$ ;  $C = TOL_{A_{kz}}$ ;  $D = AzVer$   
 $E = n_{kV}$ ;  $F = AzNk$ ;  $G = \delta$ ;  $H = \epsilon$   
 Vertrauensbereiche: \*\*\*: 99,9%; \*\*: 99%; \*: 95%

Effekt	<i>FT10</i>				Effekt	<i>TA71</i>			
	LG	Sign.	RZ	Sign.		LG	Sign.	RZ	Sign.
A	-34,28	***	245,03	***	A	-193,86	***	6.515,85	***
B	-12,88	***	121,05	***	B	-454,67	***	-324,28	
C	28,38	***	-77,31	**	C	179,77	***	228,18	
D	2,19		46,54	*	D	-15,03		193,82	
E	-76,08	***	228,95	***	E	-786,83	***	-162,46	
F	-28,58	***	149,56	***	F	-251,48	***	-162,46	
G	1,52		7,32		G	-24,80		-47,20	
H	-7,36	*	3,60		H	-36,30		-2,76	
AB	-3,55		107,17	***	AB	2,05		6.515,85	***
AC	0,64		-69,35	**	AC	32,61		6.515,85	***
AD	-0,33		43,79		AD	-25,50		331,18	
AE	1,16		202,49	***	AE	-82,67		331,18	
AF	6,88		132,54	***	AF	1,39		-324,28	
AG	-3,59		8,71		AG	-19,14		-324,28	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

<i>FT10</i>					<i>TA71</i>				
Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.	Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.
AH	-0,47		3,41		AH	-21,73		-324,28	
BC	24,67	***	-74,17	**	BC	151,45	***	-324,28	
BD	1,58		59,88	*	BD	2,16		228,18	
BE	-16,06	***	109,12	***	BE	-79,89		228,18	
BF	4,25		62,35	*	BF	-42,80		228,18	
BG	2,88		5,36		BG	-11,89		228,18	
BH	1,59		12,89		BH	-28,73		228,18	
CD	3,11		-30,86		CD	-8,69		228,18	
CE	-12,63		-59,40	*	CE	19,30		193,82	
CF	-0,84		-33,21		CF	0,89		193,82	
CG	1,03		-8,58		CG	14,52		193,82	
CH	0,69		-9,59		CH	-32,73		193,82	
DE	6,38		39,09		DE	-11,75		193,82	
DF	-1,59		39,55		DF	4,19		-162,46	
DG	2,63		4,62		DG	-14,78		-162,46	
DH	-0,28		-10,91		DH	-14,50		-162,46	
EF	15,20	***	120,12	***	EF	102,30	***	-162,46	
EG	1,70		3,50		EG	4,48		-162,46	
EH	1,67		0,89		EH	-57,83		-162,46	
FG	-1,30		3,46		FG	10,52		-159,99	
FH	3,98		-3,14		FH	12,64		-47,20	
GH	-1,30		-39,72		GH	10,98		-46,46	
ABC	0,06		-67,61	**	ABC	-4,30		6.515,85	***
ABD	-4,19		56,98	*	ABD	-40,84		6.515,85	***
ABE	-4,95		97,59	***	ABE	8,86		6.515,85	***
ABF	0,02		53,71	*	ABF	28,11		6.515,85	***
ABG	1,58		7,49		ABG	-11,58		6.515,85	***
ABH	-6,95		13,12		ABH	-6,70		6.515,85	***
ACD	5,09		-30,87		ACD	1,19		6.515,85	***
ACE	2,73		-54,43	*	ACE	22,23		6.515,85	***
ACF	-2,45		-30,15		ACF	-16,64		397,32	
ACG	-0,20		-9,74		ACG	32,20		331,18	
ACH	-2,67		-8,48		ACH	11,73		331,18	
ADE	-0,30		38,26		ADE	-14,50		331,18	
ADF	5,14		35,15		ADF	-16,41		331,18	
ADG	-3,58		5,13		ADG	11,72		331,18	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Effekt	<i>FT10</i>				Effekt	<i>TA71</i>			
	LG	Sign.	RZ	Sign.		LG	Sign.	RZ	Sign.
ADH	-5,80		-10,65		ADH	19,34		331,18	
AEF	-3,00		107,40	***	AEF	15,14		331,18	
AEG	4,06		4,63		AEG	-5,58		-324,28	
AEH	-2,28		1,91		AEH	-30,67		-324,28	
AFG	2,16		5,54		AFG	3,42		-324,28	
AFH	4,06		-2,32		AFH	20,14		-324,28	
AGH	4,25		62,35	*	AGH	-42,80		-324,28	
BCD	3,25		-18,69		BCD	12,44		-324,28	
BCE	-9,61		-62,84	*	BCE	21,30		-324,28	
BCF	0,48		-32,20		BCF	-0,05		-324,28	
BCG	0,02		-8,02		BCG	-2,02		-324,28	
BCH	-1,86		-6,45		BCH	-2,61		228,18	
BDE	4,55		49,35	*	BDE	-38,00		228,18	
BDF	-5,48		54,51	*	BDF	10,69		228,18	
BDG	2,08		18,43		BDG	-13,88		228,18	
BDH	-0,73		-22,34		BDH	15,88		228,18	
BEF	-5,38		56,94	*	BEF	57,61		228,18	
BEG	0,72		5,06		BEG	17,20		228,18	
BEH	-5,22		15,01		BEH	-21,70		228,18	
BFG	6,53		2,37		BFG	-26,45		228,18	
BFH	-0,66		1,41		BFH	-9,48		228,18	
BGH	1,28		-41,70		BGH	14,45		228,18	
CDE	-3,42		-23,79		CDE	-20,59		228,18	
CDF	-3,48		-27,81		CDF	-6,97		-227,82	
CDG	0,77		-14,44		CDG	8,38		-227,82	
CDH	9,20		13,16		CDH	18,84		193,82	
CEF	3,16		-24,61		CEF	-48,64		193,82	
CEG	4,00		-4,51		CEG	-6,64		193,82	
CEH	-1,75		-8,03		CEH	-29,39		193,82	
CFG	2,28		-8,51		CFG	13,27		193,82	
CFH	-0,78		-8,92		CFH	-11,23		193,82	
CGH	3,47		36,33		CGH	-16,83		193,82	
DEF	3,16		34,68		DEF	8,66		193,82	
DEG	-1,72		1,16		DEG	18,25		-162,46	
DEH	-2,84		-11,12		DEH	-6,28		-162,46	
DFG	2,69		8,95		DFG	23,25		-162,46	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

<i>FT10</i>					<i>TA71</i>				
Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.	Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.
DFH	-5,13		-20,14		DFH	41,28		-162,46	
DGH	0,91		-32,02		DGH	-2,09		-162,46	
EFG	1,33		-0,78		EFG	17,36		-162,46	
EFH	9,58		-7,00		EFH	2,73		-162,46	
EGH	1,77		-39,07		EGH	8,95		-162,46	
FGH	1,77		-39,07		FGH	8,95		-47,20	
ABCD	7,98		-18,07		ABCD	-18,41		6.515,85	***
ABCE	5,25		-58,70	*	ABCE	-7,73		6.515,85	***
ABCF	-4,19		-29,29		ABCF	2,52		6.515,85	***
ABCG	4,09		-9,12		ABCG	0,02		6.515,85	***
ABCH	-2,78		-6,77		ABCH	1,52		6.515,85	***
ABDE	-2,25		48,26	*	ABDE	-7,03		6.515,85	***
ABDF	2,06		50,50	*	ABDF	-43,38		6.515,85	***
ABDG	-4,44		19,57		ABDG	3,41		6.515,85	***
ABDH	-2,44		-21,32		ABDH	5,44		6.515,85	***
ABEF	4,11		49,75	*	ABEF	7,98		6.515,85	***
ABEG	-2,11		6,84		ABEG	-7,70		6.515,85	***
ABEH	-4,61		15,81		ABEH	-4,20		6.515,85	***
ABFG	-5,52		5,28		ABFG	5,67		6.515,85	***
ABFH	4,92		1,89		ABFH	-28,45		6.515,85	***
ABGH	3,73		-40,78		ABGH	-13,17		6.515,85	***
ACDE	3,72		-25,17		ACDE	1,31		6.515,85	***
ACDF	0,13		-26,23		ACDF	4,16		6.515,85	***
ACDG	-2,50		-13,37		ACDG	4,41		6.515,85	***
ACDH	-0,88		15,32		ACDH	-7,16		6.515,85	***
ACEF	6,20		-23,44		ACEF	-1,89		-899,94	
ACEG	2,80		-5,37		ACEG	-1,86		397,32	
ACEH	1,73		-7,87		ACEH	-27,89		397,32	
ACFG	5,73		-9,84		ACFG	-34,05		397,32	
ACFH	5,80		-9,00		ACFH	-16,33		331,18	
ACGH	2,11		35,47		ACGH	27,86		331,18	
ADEF	-3,83		32,22		ADEF	-1,66		331,18	
ADEG	2,73		1,01		ADEG	-16,41		331,18	
ADEH	-1,64		-9,67		ADEH	1,34		331,18	
ADFG	-1,33		8,88		ADFG	21,13		331,18	
ADFH	5,80		-20,55		ADFH	21,81		331,18	

Fortsetzung auf der nächsten Seite



C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

<i>FT10</i>					<i>TA71</i>				
Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.	Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.
ADGH	0,08		-31,19		ADGH	-8,03		331,18	
AEFG	-3,06		0,99		AEFG	-2,14		331,18	
AEFH	-4,63		-4,97		AEFH	7,39		-324,28	
AEGH	4,69		-39,04		AEGH	14,14		-324,28	
AFGH	4,47		-43,47		AFGH	-8,36		-324,28	
BCDE	-2,06		-8,68		BCDE	17,66		-324,28	
BCDF	-0,06		-15,62		BCDF	5,72		-324,28	
BCDG	-0,09		-18,86		BCDG	-7,59		-324,28	
BCDH	5,81		9,10		BCDH	-3,03		-324,28	
BCEF	3,02		-30,22		BCEF	-16,64		-324,28	
BCEG	1,83		-4,55		BCEG	-18,30		-324,28	
BCEH	-5,08		-7,14		BCEH	-20,02		-324,28	
BCFG	1,17		-5,71		BCFG	16,11		-324,28	
BCFH	-0,98		-6,34		BCFH	45,20		-324,28	
BCGH	2,98		23,05		BCGH	17,27		-320,63	
BDEF	1,98		46,82	*	BDEF	-27,28		228,18	
BDEG	4,89		15,33		BDEG	20,16		228,18	
BDEH	2,48		-23,39		BDEH	1,34		228,18	
BDFG	-0,27		24,88		BDFG	-3,78		228,18	
BDFH	-1,30		-30,31		BDFH	-3,72		228,18	
BDGH	-2,36		-30,88		BDGH	-8,19		228,18	
BEFG	-2,38		0,99		BEFG	-22,55		228,18	
BEFH	1,78		1,71		BEFH	-6,95		228,18	
BEGH	-0,25		-39,98		BEGH	0,67		228,18	
BFGH	4,00		-45,91	*	BFGH	-5,48		228,18	
CDEF	6,80		-24,97		CDEF	-1,75		228,18	
CDEG	-1,73		-11,68		CDEG	-8,72		-227,82	
CDEH	-6,02		18,00		CDEH	35,63		-227,82	
CDFG	-3,55		-13,68		CDFG	-21,78		-227,82	
CDFH	-1,52		22,45		CDFH	12,56		-227,82	
CDGH	-0,08		15,94		CDGH	-14,88		209,14	
CEFG	-3,06		-2,50		CEFG	5,36		193,82	
CEFH	4,22		-6,11		CEFH	-29,58		193,82	
CEGH	-5,50		37,83		CEGH	-13,92		193,82	
CFGH	-1,09		31,62		CFGH	0,05		193,82	
DEFG	1,09		6,30		DEFG	-1,84		193,82	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

<i>FT10</i>					<i>TA71</i>				
Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.	Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.
DEFH	2,19		-21,62		DEFH	33,56		-162,46	
DEGH	3,19		-35,46		DEGH	-11,63		-162,46	
DFGH	-1,41		-26,95		DFGH	4,88		-162,46	
EFGH	-5,67		-42,45		EFGH	-13,36		-162,46	
DEFGH	-1,19		-31,51		DEFGH	-7,91		-192,44	
CEFGH	-1,56		32,88		CEFGH	0,83		193,82	
CDFGH	-0,58		5,36		CDFGH	6,97		-227,82	
CDEGH	-4,64		18,24		CDEGH	0,22		-227,82	
CDEFH	-1,61		28,98		CDEFH	10,59		-227,82	
CDEFG	1,83		-12,30		CDEFG	-3,31		228,18	
BEFGH	0,03		-43,69		BEFGH	9,42		228,18	
BDFGH	0,23		-28,31		BDFGH	-0,22		228,18	
BDEGH	0,83		-30,25		BDEGH	-17,16		228,18	
BDEFH	0,98		-33,16		BDEFH	-2,44		228,18	
BDEFG	-1,39		23,80		BDEFG	-0,75		228,18	
BCFGH	-0,11		21,49		BCFGH	-14,42		-324,28	
BCEGH	4,61		21,61		BCEGH	21,61		-324,28	
BCEFH	0,30		-5,59		BCEFH	3,98		-324,28	
BCEFG	0,61		-2,72		BCEFG	16,83		-324,28	
BCDGH	-6,84		35,85		BCDGH	-25,03		-324,28	
BCDFH	2,31		18,34		BCDFH	-11,31		-324,28	
BCDFG	6,38		-25,89		BCDFG	0,94		-324,28	
BCDEH	-0,19		13,19		BCDEH	-15,31		-324,28	
BCDEG	5,63		-19,71		BCDEG	-31,38		-324,28	
BCDEF	-1,00		-8,85		BCDEF	-0,44		-324,28	
AEFGH	0,31		-42,28		AEFGH	24,70		-326,42	
ADFGH	-1,48		-26,74		ADFGH	38,88		331,18	
ADEGH	2,14		-34,49		ADEGH	-28,03		331,18	
ADEFH	-6,98		-20,75		ADEFH	3,44		331,18	
ADEFG	-2,20		5,71		ADEFG	0,19		331,18	
ACFGH	-0,83		30,33		ACFGH	-15,70		357,02	
ACEGH	2,17		37,24		ACEGH	25,92		397,32	
ACEFH	5,70		-7,09		ACEFH	11,05		397,32	
ACEFG	-0,14		-3,44		ACEFG	-22,42		397,32	
ACDGH	0,47		15,42		ACDGH	-25,72		6.515,85	***
ACDFH	-1,91		26,14		ACDFH	-8,63		6.515,85	***

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C.1 Versuchsläufe zur Reihenfolgeoptimierung

Effekt	<i>FT10</i>				Effekt	<i>TA71</i>			
	LG	Sign.	RZ	Sign.		LG	Sign.	RZ	Sign.
ACDFG	-0,75		-13,25		ACDFG	11,50		6.515,85	***
ACDEH	-1,19		18,95		ACDEH	17,72		6.515,85	***
ACDEG	-0,78		-10,15		ACDEG	2,59		6.515,85	***
ACDEF	-		-24,73		ACDEF	23,84		6.515,85	***
ABFGH	-0,23		-44,64		ABFGH	-11,98		6.515,85	***
ABEGH	4,30		-39,10		ABEGH	16,39		6.515,85	***
ABEFH	-3,05		2,74		ABEFH	1,98		6.515,85	***
ABEFG	3,36		3,08		ABEFG	15,55		6.515,85	***
ABDGH	3,94		-29,95		ABDGH	13,03		6.515,85	***
ABDFH	3,00		-31,31		ABDFH	5,34		6.515,85	***
ABDFG	2,22		23,81		ABDFG	-6,56		6.515,85	***
ABDEH	-3,13		-21,56		ABDEH	-25,81		6.515,85	***
ABDEG	-2,34		16,13		ABDEG	-23,59		6.515,85	***
ABDEF	-5,69		44,68		ABDEF	-1,44		6.515,85	***
ABCGH	0,38		22,16		ABCGH	-2,33		6.515,85	***
ABCFH	6,34		-7,79		ABCFH	-39,05		6.515,85	***
ABCFG	-1,75		-7,73		ABCFG	-33,92		6.515,85	***
ABCEH	3,97		-8,14		ABCEH	8,27		6.515,85	***
ABCEG	-3,69		-5,16		ABCEG	8,83		6.515,85	***
ABCDE	-3,42		-9,04		ABCDE	-38,66		6.515,85	***
ABCDH	-3,33		11,74		ABCDH	-20,00		6.515,85	***
ABCDG	-2,92		-17,73		ABCDG	-27,47		6.515,85	***
ABCDF	-0,27		-14,30		ABCDF	-22,94		6.515,85	***
ABCDE	-3,42		-9,04		ABCDE	-38,66		6.515,85	***
ABCDEF	3,27		-8,54		ABCDEF	-1,50		6.515,85	***
ABCDEG	0,52		-18,55		ABCDEG	-10,84		6.515,85	***
ABCDFG	-3,70		-24,45		ABCDFG	-8,25		6.515,85	***
ABCEFG	-3,59		-4,18		ABCEFG	12,45		6.515,85	***
ABDEFG	-1,19		22,55		ABDEFG	-27,63		6.515,85	***
ACDEFG	-5,59		-11,34		ACDEFG	26,19		6.515,85	***
BCDEFG	-5,09		-26,65		BCDEFG	21,59		-324,28	
ABCDEH	0,08		14,92		ABCDEH	6,06		6.515,85	***
ABCDFH	-1,95		22,63		ABCDFH	5,97		6.515,85	***
ABCEFH	5,28		-7,75		ABCEFH	0,70		6.515,85	***
ABDEFH	1,69		-33,49		ABDEFH	-2,91		6.515,85	***
ACDEFH	-8,16		31,72		ACDEFH	5,19		6.515,85	***

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C Versuchsdaten zur Umsetzung

<i>FT10</i>					<i>TA71</i>				
Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.	Effekt	LG	Sign.	RZ	Sign.
BCDEFH	-2,00		24,76		BCDEFH	-16,84		-324,28	
ABCDEG	0,52		-18,55		ABCDEG	-10,84		6.515,85	***
ABCDEH	0,08		14,92		ABCDEH	6,06		6.515,85	***
ABCDGH	2,70		33,68		ABCDGH	31,09		6.515,85	***
ABCEGH	3,66		21,02		ABCEGH	9,17		6.515,85	***
ABDEGH	3,78		-28,96		ABDEGH	-21,53		6.515,85	***
ACDEGH	4,13		17,49		ACDEGH	-38,16		6.515,85	***
BCDEGH	-5,69		36,09		BCDEGH	0,06		-324,28	
ABCFGH	4,72		19,66		ABCFGH	-2,52		6.515,85	***
ABDFGH	1,09		-27,56		ABDFGH	16,75		6.515,85	***
ACDFGH	6,72		4,95		ACDFGH	3,44		6.515,85	***
BCDFGH	-8,88		31,27		BCDFGH	10,56		-324,28	
ABEFGH	-4,05		-42,45		ABEFGH	-3,55		6.515,85	***
ACEFGH	0,42		31,76		ACEFGH	-10,83		397,32	
BCEFGH	0,20		20,16		BCEFGH	3,05		-324,28	
CDEFGH	2,67		9,60		CDEFGH	23,25		-227,82	
ABCDEFG	7,23		-25,38		ABCDEFG	8,63		6.515,85	***
ABCDEFH	-11,55		28,44		ABCDEFH	1,34		6.515,85	***
ABCDEGH	2,33		34,14		ABCDEGH	-11,47		6.515,85	***
ABCDFGH	1,86		29,85		ABCDFGH	17,44		6.515,85	***
ABCEFGH	4,50		18,70		ABCEFGH	3,92		6.515,85	***
ABDEFGH	-3,88		-27,79		ABDEFGH	-1,75		6.515,85	***
ACDEFGH	-2,50		9,62		ACDEFGH	3,38		6.515,85	***
BCDEFGH	6,53		31,55		BCDEFGH	7,47		-324,28	
ABCDEFH	6,08		31,10		ABCDEFH	11,50		6.515,85	***

Zur Ermittlung der Signifikanz der Effekte wurden nach KLEPPMANN (2013, S. 125) die zufälligen Effekte zu einer Schätzung der Zufallsstreuung (sog. Pooling) zusammengefasst.

Die zufälligen Effekte werden mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsnetzes bestimmt (s. Abb. C.1 bis C.4 für die betrachteten Effekte und Instanzen). Zur Erstellung des Wahrscheinlichkeitsnetzes werden die Effekte nach ihrer Größe geordnet und mit einer fortlaufenden Ordnungsnummer  $O$  versehen. Der zugehörige Prozentwert berechnet sich nach KLEPPMANN (2013, S. 73ff.) aus der Ord-

nungsnummer  $O$  und der Anzahl  $N$  der Effekte und Wechselwirkungen nach folgender Formel:<sup>66</sup>

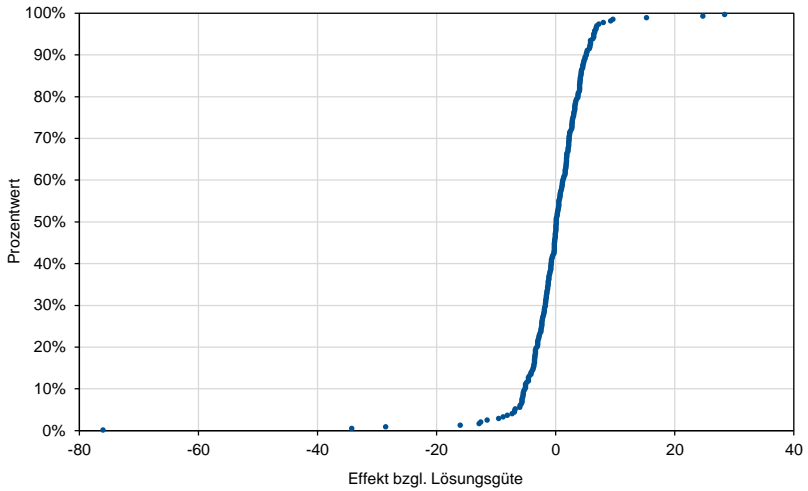
$$\frac{O - 0,5}{N} \cdot 100 \% \quad (\text{C.1})$$

Da sich die meisten Effekte näherungsweise auf einer Geraden in der Nähe von Null liegen, können diese als zufällig betrachtet werden. Die vermuteten wahren Effekte sind dagegen die Werte, die als Ausreißer zu betrachten sind.

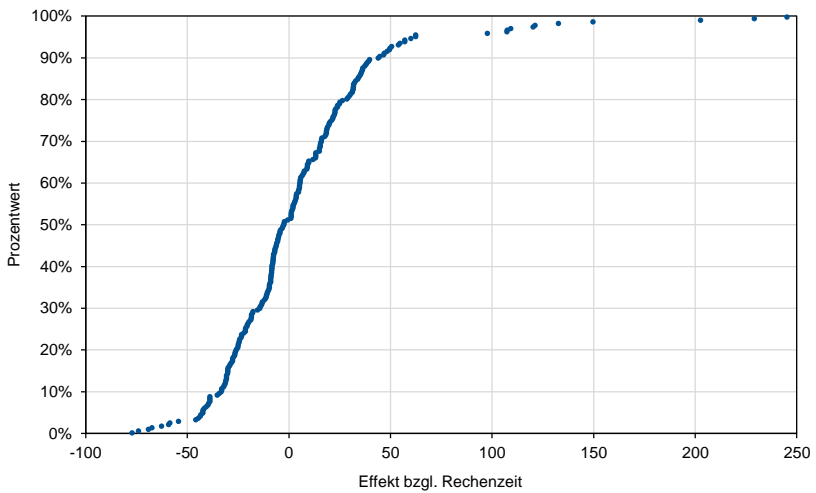
Zur Bestimmung der Signifikanz eines Effekts ist die Berechnung des Signifikanzniveaus erforderlich, dass sich nach KLEPPMANN (2013, S. 125) durch Multiplikation der Standardabweichung der Zufallsstreuung mit dem t-Wert der studentischen t-Verteilung ergibt. Die Signifikanzniveaus der wahren Effekte sind in Tabelle C.5 eingetragen, sofern sie das 95 %ige Signifikanzniveau überschreiten.

---

<sup>66</sup> Zur Vermeidung einer doppelten Belegung der Formelzeichen wurden die Formelzeichen für Ordnungsnummer  $O$  und der Anzahl der Elemente  $N$  gegenüber den Ausführungen von KLEPPMANN (2013, S. 74) geändert.



**Abb. C.1:** Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte zur Lösungsgüte der *FT10*-Instanz



**Abb. C.2:** Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte zur Rechenzeit der *FT10*-Instanz

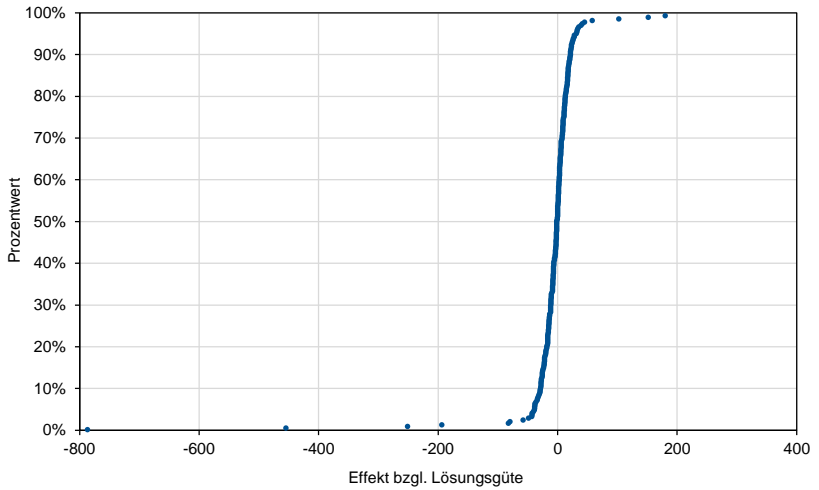


Abb. C.3: Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte zur Lösungsgüte der *TA71*-Instanz

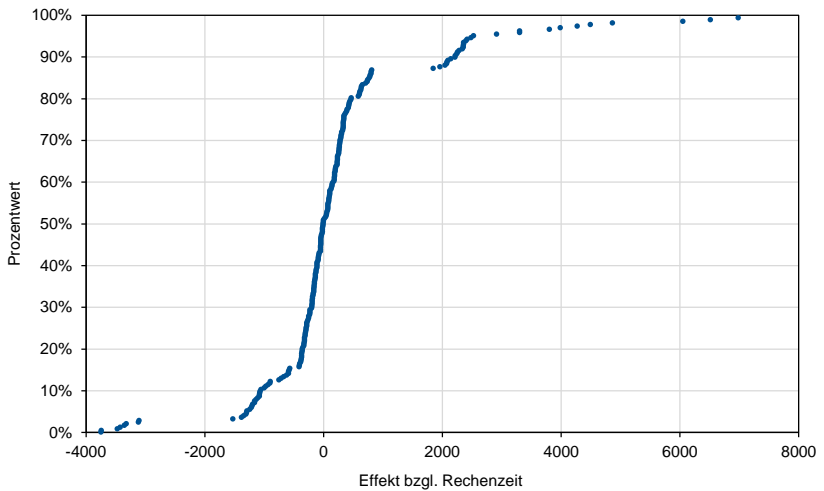


Abb. C.4: Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte zur Lösungsgüte der *TA71*-Instanz

### C.1.4 Versuch zum Vergleich von Faktoreffektkombinationen

Für einen weiteren Versuch wurden ausgewählte Faktorkombinationen jeweils zehn Mal realisiert (s. Tabelle C.6 in Anhang C.1.4), um Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit des Algorithmus zu gewinnen sowie um eine Abschätzung über das Verhältnis der Faktoreffektkombination zu erhalten. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Für einen weiteren Versuch wurden die nachfolgend vorgestellten Faktorstufenkombinationen jeweils zehn Mal realisiert (s. Tabelle C.6). Diese wurden für die *FT10*-Instanz so ausgewählt, dass zu erwartende beste Lösungsgüte (Nr. 1) sowie, mit veränderten Werten für  $n_{pop}$  und  $n_{kV}$ , Nr. 2 und 3) sowie kürzeste Rechenzeit (Nr. 4) ausgewählt. Darüber hinaus zwei Lösungen, die einen Kompromiss zwischen Lösungsgüte und Rechenzeit darstellen (Nr. 5 und 6). Des Weiteren wurden aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan die Kombinationen ausgewählt, bei denen in kurzer Zeit eine hohe Lösungsgüte erreicht wurde (Nr. 35, 51, 109 und 225 aus C.3). Für die *TA71*-Instanz wurden ebenfalls Kombinationen für eine hohe Lösungsgüte (Nr. 11), eine kurze Rechenzeit (Nr. 12), Kompromisswerte (Nr. 13 und 14) sowie ausgewählte Kombinationen aus dem vollfaktoriellen Versuch (Nr. 211, 215, 223 aus C.4) ausgewählt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen C.7 und C.8 dargestellt.

**Tab. C.6:** Versuchskonfiguration für den zweiten Versuchslauf (je 10 Realisierungen)

<i>Nr.</i>	<i>Instanz</i>	$n_{pop}$	$d_{max}$	$TOL_{Akz}$	$AzVer$	$n_{kV}$	$AzNk$	$\delta$	$\epsilon$
1	FT 10	10	100	10	25	100	10	1	0,1
2	FT 10	20	100	10	25	200	15	1	0,1
3	FT 10	100	100	10	25	200	20	1	0,1
4	FT 10	3	10	150	25	5	3	1	0,1
5	FT 10	5	20	10	25	20	5	1	0,1
6	FT 10	10	20	10	25	100	5	1	0,1
7	FT 10	3	100	10	25	5	10	1	0,001
8	FT 10	3	100	10	25	100	10	1	0,001
9	FT 10	3	10	150	250	5	10	2	0,1
10	FT 10	3	10	10	25	5	10	2	0,1
11	TA 71	20	1000	10	25	100	10	2	0,1
12	TA 71	2	50	300	25	5	3	1	0,1
13	TA 71	5	200	200	25	20	5	1	0,1
14	TA 71	10	200	10	25	100	5	1	0,1
15	TA 71	2	1000	10	25	100	3	2	0,1
16	TA 71	2	1000	300	25	100	3	2	0,1
17	TA 71	2	1000	300	250	100	3	2	0,1



**Tab. C.7:** Ergebnisse des zweiten Versuchslaufs für die *FT10*-Benchmarkinstanzen

<i>Nr.</i> Einheit	$\varnothing C_{max}$ [ZE]	$C_{max}(s_{opt})$ [ZE]	$\sigma_{C_{max}}$ [%]	$\varnothing RZ$ [Sek.]	$RZ(s_{opt})$ [Sek.]	$\sigma_{RZ}$ [%]
1	1.032,0	981	3,13	140,06	181,22	17,27
2	1.003,1	962	3,05	646,06	441,08	41,55
3	1.004,9	976	2,29	2.944,56	3.431,22	31,16
4	1.188,9	1.135	2,69	0,57	1,16	43,59
5	1.053,3	1.029	1,00	14,33	19,82	25,68
6	1.056,9	1.007	1,99	60,84	127,50	39,44
7	1.094,1	1.057	2,26	6,69	11,30	32,82
8	1.056,0	987	3,11	54,20	97,96	32,14
9	1.124,6	1.083	3,28	2,82	2,81	23,71
10	1.118,2	1.078	1,95	3,36	4,31	29,08

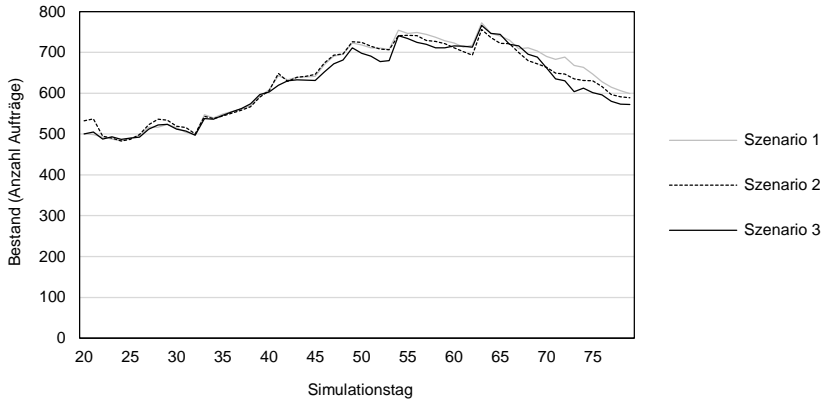
**Tab. C.8:** Ergebnisse des zweiten Versuchslaufs für die *TA71*-Benchmarkinstanzen

<i>Nr.</i> Einheit	$\varnothing C_{max}$ [ZE]	$C_{max}(s_{opt})$ [ZE]	$\sigma_{C_{max}}$ [%]	$\varnothing RZ$ [Sek.]	$RZ(s_{opt})$ [Sek.]	$\sigma_{RZ}$ [%]
11	6.542,9	6.345	2,06 %	3.952,04	6.137,87	32,81 %
12	7.978,6	7.869	0,57 %	2,15	3,97	38,70 %
13	6.238,2	6.093	1,67 %	24.456,72	32.943,74	29,73 %
14	7.256,4	7.019	1,66 %	236,21	475,95	40,55 %
15	6.614,2	6.372	2,20 %	1.301,69	2.425,13	50,55 %
16	6.887,5	6.706	1,64 %	343,42	468,92	28,06 %
17	6.944,7	6.671	2,26 %	302,44	520,78	35,90 %

## C.2 Simulationstechnisches Anwendungsbeispiel

**Tab. C.9:** Spezifikation des Computers der Ablaufsimulationsversuche

Betriebssystem:	Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1
Prozessor:	Intel® Core™ i7-4800MQ CPU, 2.70 GHz
RAM:	16 GB (15,6 verwendbar)



**Abb. C.5:** Bestandsverläufe der Simulationsversuche zwischen Tag 20 und Tag 80

### C.3 Ortungsbasierte Datenerfassung

**Tab. C.10:** Betriebslayoutmatrix des Laboraufbaus (Layout aus Abb. 8.4 um 90° nach links gedreht)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	21	21	21	22	22	0	30	30	31	31	31	0	0
0	0	0	0	0	0	0	21	21	21	22	22	0	30	30	31	31	31	0	0
0	0	0	0	0	0	0	21	21	21	22	22	0	30	30	31	31	31	0	0
0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	32	32	32	0	0
0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	32	32	32	0	0
0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	32	32	32	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	52	52	52	0	0	0	40	40	40	42	42	42	0	0
0	0	0	0	0	0	52	52	52	0	0	0	40	40	40	42	42	42	0	0
0	0	0	0	0	0	52	52	52	0	0	0	40	40	40	42	42	42	0	0
0	0	0	0	0	0	51	51	51	50	50	50	0	0	0	41	41	41	0	0
0	0	0	0	0	0	51	51	51	50	50	50	0	0	0	41	41	41	0	0
0	0	0	0	0	0	51	51	51	50	50	50	0	0	0	41	41	41	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nr.	Flächenart	Bezeichnung
11	Zusatzfläche	Start und Ende der Produktion
21	Bereitstellfläche	Maschine $M_2$ (Fräsmaschine EMCO Concept Mill 105)
22	Fertigungsfläche	
23	Abholfläche	
31	Bereitstellfläche	Maschine $M_3$ (Fräsmaschine EMCO Concept Mill 255)
32	Fertigungsfläche	
33	Abholfläche	
41	Bereitstellfläche	Maschine $M_4$ (Fräsmaschine EMCO Concept Mill 155)
42	Fertigungsfläche	
43	Abholfläche	
51	Bereitstellfläche	Maschine $M_5$ (Drehmaschine EMCO Concept Turn 155)
52	Fertigungsfläche	
53	Abholfläche	



## D Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Datenerfassung und Produktionssteuerung in der Werkstattfertigung untersucht wurden. Deren Ergebnisse sind in Teilen in das vorliegende Dokument eingegangen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt.

BALLAUF, M.

Überführung eines Konzepts zur adaptiven Werkstattsteuerung in ein System zur praktischen Anwendung, Semesterarbeit, 2015. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 4.3 und 8.2 eingegangen.

BLUM, M.

Weiterentwicklung eines Genetischen Algorithmus zur Reihenfolgebildung, Bachelor's Thesis, 2014. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 6.3, 6.3.2, 8.1 und Anhang B eingegangen.

BUSCHLE, F.

Fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung mittels mathematischer Optimierung, Semesterarbeit, 2014. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 4.3, 6.2, 6.3.2 und 6.3.3 eingegangen.

FRANK, N.

Ortungsbasierte Erfassung von Betriebsdaten zur Realisierung einer adaptiven Werkstattsteuerung, Semesterarbeit, 2014. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 2.3.3, 7.2, 7.3.1 und 8.3 eingegangen.

KOLL, S.

Entwicklung einer Modellierungsvorschrift zur Darstellung und Berechnung von Produktionsplänen, Bachelor's Thesis, 2014. Teile der Arbeit sind in Abschnitt 2.2.1.3 eingegangen.

KÖLLE, E.

Verrechnung unterschiedlicher Zielgrößen der Produktionssteuerung in der Werkstattfertigung, Bachelor's Thesis, 2013. Teile der Arbeit sind in Abschnitt 2.3.2 eingegangen.

MEINE FERNÁNDEZ-VIGIL, P.

Entwicklung eines Abweichungs- und Störungsmanagements zur Ermöglichung einer adaptiven Werkstattsteuerung, Master's Thesis, 2014. Teile der Arbeit sind in Abschnitte 2.3.1, 5.1.2, 5.1, 5.2 und 5.3 eingegangen.

NISSEN, F.

Untersuchung der Fertigung hochvarianter Produkte deutscher Unternehmen auf Basis produktionsteuerungsrelevanter Aspekte, Semesterarbeit, 2013. Teile der Arbeit sind in Anhang A eingegangen.

Darüber hinaus wurde während der Erstellung dieser Arbeit mit dem Ressourcenkontenverfahren ein weiteres Steuerungsverfahren für variantenreiche Kleinserienfertigungssysteme entwickelt. Dieses Verfahren erweitert die Steuerungssystematik der *DBF* von LÖDDING (2001) um weitere Steuerungsmechanismen zur Engpassregelung. Das Ressourcenkontenverfahren wurde durch REINHART ET AL. (2013) veröffentlicht und ist in Abschnitt 2.1.1 in den Stand der Technik eingeflossen. Nachfolgend aufgeführte Studienarbeiten haben bei der Entwicklung des Ressourcenkontenverfahrens einen wesentlichen Beitrag geleistet.

BATZNER, J.

Entwicklung eines Modells einer Werkstattsteuerung für die Bewertung von Produktionssteuerungsmethoden, Bachelor's Thesis, 2012.

SELLMAIER, P.

Weiterentwicklung eines neuartigen Fertigungssteuerungsverfahrens für die industrielle Anwendung im Rahmen eines Simulationsmodells für Tecnomatix Plant Simulation, Studienarbeit, 2013.

WELTER, E.

Konzeption einer Selbststeuerung für die Produktion hochvarianter, diskreter Produkte, Diplomarbeit, 2012.